



微型钢管桩计算方法优化分析及应用研究

李 帅, 曹正锋, 陈金宏, 罗崎磷, 袁 琴

(贵州省煤矿设计院有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要:微型钢管桩在滑坡、基坑等领域应用越来越广泛。结合贵州习水某滑坡应急治理项目,利用现有设计计算理论按沿滑面的抗剪计算桩的排数、桩身内力以及嵌固深度,选择合适的桩径及壁厚,结合桩水平承载力特征值计算公式进行验算,最终完成该项目支护设计工作。现有计算理论未考虑桩砂浆体抗剪强度,偏于保守,本次设计将砂浆体抗剪考虑在内,优化了设计并减少了工程量,并提出采用由位移控制性的水平承载力特征值进行验算。通过对桩顶位移进行长期监测,证明钢管桩支护设计工作达到了阻滑的目的,滑坡在支护后处于稳定状态。

关键词:微型钢管桩; 滑坡; 桩身内力; 桩径; 壁厚; 桩水平承载力特征值

中图分类号:U418.5+5

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)06-0001-08

doi:10.13402/j.gcjs.2024.06.069

Optimization analysis and application research on calculation methods for micro steel pipe piles

LI Shuai¹, CAO Zhengfeng, CHEN Jinhong, LUO Qi lin, YUAN Qin¹

(Guizhou Coal Mine Design Research Institute, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Micro steel pipe piles are increasingly widely used in fields such as landslides and foundation pits. Some practical method and theory for calculation on micro steel pipe piles are proposed but not yet formed a uniform cognition. The number of pile rows and internal force and embedded depth are calculated by the shear resistance along the sliding surface through the design calculation theory and the appropriate pile diameter and steel pipe wall thickness are selected, calculation of characteristic values of horizontal bearing capacity of piles is checked, eventually completed design work. The existing calculation theory does not consider the shear strength of the pile mortar body, which is conservative. In this design, the shear strength of the mortar body is taken into account, and the design is optimized and the engineering quantity is reduced. It is proposed to use displacement controlled horizontal bearing capacity characteristic values for verification. By long-term monitoring of pile top displacement, the steel pipe pile support design has achieved the goal of preventing sliding and the landslide was in stable state after treating.

Key words: micro steel pipe piles; landslide; internal force of pile body; pile diameter; wall thickness; the horizontal bearing capacity of piles

近年来,微型钢管桩被广泛应用于各类工程之中,尤其是滑坡、基坑边坡、地基加固处理等。滑坡应急治理项目往往时间紧迫,需要快速施工并起到作用,钢管桩优势由此显现出来。钢管桩

施工对岩土体扰动小,质量轻,且对现状破坏程度小,在施工期间可以很好地确保现状,而钢管本身具备强度,属于预制桩类型,在混凝土浇筑之前已经起到了一定阻滑作用,在浇筑混凝土之

收稿日期:2023-11-27

基金项目:贵州省煤矿安全高效开采技术支撑与服务人才基地基金项目(GMY-RD2022.KJ-009)

作者简介:李 帅(1991—),男,工程师,从事边坡勘察支护设计的研究工作。

通信作者:曹正锋(1998—),男,助理工程师,从事地质灾害的研究工作。

后桩周土体强度进一步增强,因此要优于其他支护形式。因此,本文对钢管桩加固滑坡支护设计的研究具有重要意义。

钢管桩一般形式:以一定壁厚的无缝钢管^[1],通过钻孔设备,钻入稳定岩土体一定深度;随后将钢管置于钻孔,通过浇筑混凝土或者水泥浆,将钢管水泥浆或者混凝土连成一个整体。为了增加钢管桩受力性能,可以在钢管桩内插钢筋,在桩顶浇筑冠梁将钢管桩连接成一个整体。微型钢管桩起源于意大利,在 20 世纪四、五十年代被首次应用于基础托换工程^[2]。钢管桩优点较多,省时省工,可以快速施工,对施工空间、场地环境等要求低,不需要重型设备,施工速度快,可以节省大量工程费用,产生良好的经济效益^[3,4]。

在前人研究基础上,本文将砂浆抗剪考虑在内,对设计进行优化以减少工程量,提出采用由位移控制的水平承载力特征值进行验算。结合实际工程,对工程完成施工后两年进行桩顶位移及滑坡位移动移进行监测,以期可为后续钢管桩设计提供参考。

1 微型钢管桩计算公式及验算公式

根据滑坡防治设计规范(GB/T 38509—2020)^[5]附录 F“小口径组合抗滑桩计算公式”,可等效将小口径组合抗滑桩群与岩土体作为一个柔性抗滑挡墙,计算简图如图 1、2 所示,小口径组合抗滑桩横向桩间距计算公式如下。

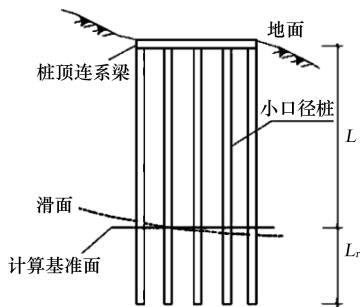


图 1 剖面

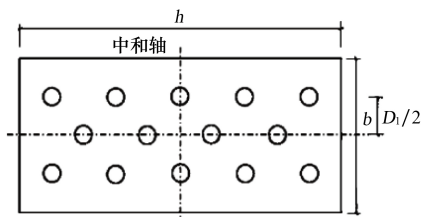


图 2 水平截面

$$R_r = \frac{P_t L}{2D_1} \quad (1)$$

$$P_t = cA \left[\frac{1}{K_p \tan j} (B - 2K_p^{1/2} \tan j - 1) + g_1/g_2 \right] - c(D_1 g_1/g_2 - 2D_2 K_p^{-1/2}) + \frac{r \times L}{K_p} (A \times B - D_2) \quad (2)$$

$$A = D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(K_p^{1/2} \tan j + K_p - 1)} B = \exp$$

$$\left[\frac{D_1 - D_2}{D_2} K_p \tan j \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{j}{4} \right) \right] \quad (3)$$

$$g_1 = 2 \tan j + 2K_p^{1/2} + K_p^{-1/2} g_2 = \tan j \times K_p^{1/2} + K_p - 1, p \leq R_r \quad (4)$$

式中: R_r 为结构极限抗力, kN; D_1 为桩中心间距, m; D_2 为桩中心间距, m; L 为计算基准面至桩顶的距离, m, 计算基准面宜取通过抗滑挡墙中和轴与滑面交点的水平面; L_r 为小口径嵌固段长度, m; γ 为滑体重度, (kN/m^3); K_p 为被动土压力系数; c 为滑体沿滑面上的黏聚力, kPa; j 为滑体沿滑面上的内摩擦角, ($^\circ$); P 为滑坡推力, kN。

沿着滑面的抗剪计算桩的总数及配筋量根据式确定:

$$P \leq R_{fa} R_{fa} = n \tau_{fa} \tau_{fa} = \beta_a [\tau] A_s \beta_a = \sqrt[4]{E_s/E_t} \quad (5)$$

式中: P 为滑坡推力, kN; R_{fa} 为小口径桩组合抗滑桩群抗滑力, kN; n 为每米小口径桩数量, 根; τ_{fa} 为单桩容许抗剪强度, kN; β_a 为考虑钢筋弯曲影响的折减系数; E_s 、 E_t 为土体及小口径桩的弹性模量, kPa; $[\tau]$ 为钢筋抗剪强度, kPa; A_s 为钢筋横截面积, m^2 。

$$\sigma_R \leq f_a \sigma_R = \frac{N_R}{A_R} + \frac{M_R}{I_R} \cdot y A_R = m_1 + A_p n + bh \quad (6)$$

$$A_p = (m_2 - 1) A_s n + A_e I_R = m_1 A_p \sum x^2 + \frac{bh^3}{12} \sigma'_R =$$

$$m_1 \sigma'_R < \sigma_{ca} \sigma'_{sc} = m_2 \sigma'_R < f' \quad (7)$$

式中: σ_R 为计算基准面处小口径桩加固体上作用的最大压应力, kPa; f_a 为计算基准面处经修正后地基承载力特征值, kPa; A_R 为计算基准面处小口径组合抗滑桩加固体的等效换算面积, m^2 ; I_R 为计算基准面处小口径组合抗滑桩加固体等效截面惯性矩, m^4 ; n 为每米小口径桩数量, 根; m_1 为桩与其周围土的弹性模量比; m_2 为钢筋与砂浆的弹性模量比; b 、 h 为小口径组合抗滑桩布置

的单位宽度及长度, m; A_e 为小口径桩截面积, m^2 ; N_R 为计算基准面上作用的垂直力, kN; M_R 为计算基准面上作用的弯矩, (kN·m); x 为计算基准面中和轴至个个小口径桩的距离, m; y 为计算基准面中和轴至个个小口径桩的距离, m; σ'_R 为作用于的最大压应力, kPa; σ_{ca} 为砂浆压应力设计值, kPa; f' 为钢筋抗压设计值, kPa。

根据 GB/T 38509—2020, 桩的水平承载力由位移控制时, 可按下公式估算预制桩、钢桩、桩身配筋率不小于 0.65% 的灌注桩单桩水平承载力特征值:

$$R_{ha} = 0.75 \frac{a^3 EI}{v_x} x_{0a} \quad (8)$$

式中: EI 桩身抗弯刚度, $N \cdot m^2$; x_{0a} 桩顶允许水平位移, mm; v_x 桩顶水平位移系数。

利用该公式验算单桩水平承载力是否满足规范要求。

2 工程实例

治理工程项目位于贵州某县, 地貌类型主要以侵蚀成因为主形成的斜坡沟谷地貌。地势整体呈北西部高, 南东部低。区内最高点位于北西部山顶, 高程为 793.5 m, 最低点位于南部沟底, 高程为 770.3 m。最大高差为 23.2 m。

根据区域地质资料及钻孔揭露, 勘查区地层主要为第四系全新统松散堆积层、填土和志留系下统韩家店组(S_1h)石灰岩。

(1) 人工填土(Q_4^{ml}): 分布在场地下方区域, 为天然气管道施工回填形成, 揭露厚度 1.5 ~ 4.2 m, 主要由中风化石灰岩碎块(屑)及黄褐色黏

土组成, 碎石含量在 10% ~ 50% 不等, 碎石粒径一般为 5 ~ 50 mm, 碎石多为棱角 ~ 次棱角状, 磨圆度差。

(2) 第四系残坡积层(Q_4^{el+dl}): 分布在场地斜坡区域, 揭露厚度 2.5 ~ 7.0 m, 以黄色 ~ 黄褐色红黏土为主, 黏土呈可塑状态, 结构较松散, 上部夹少量植物根系, 含少量碎石, 碎石多为棱角 ~ 次棱角状, 磨圆度差, 碎石含量在 5% ~ 30% 不等, 碎石母岩成分以泥灰岩为主。

(3) 强风化石灰岩: 分布在场地斜坡区域, 灰褐色, 薄至中厚层状构造, 揭露厚度 1.0 ~ 6.7 m, 岩体裂隙较发育, 易风化, 岩芯破碎。

(4) 中风化石灰岩: 分布于整个勘查区, 揭露厚度 2.5 ~ 4.0 m, 灰褐色, 中厚层状构造, 岩体裂隙较发育, 充填方解石脉, 钙质、铁质胶结, 结合一般; 局部见溶蚀现象, 钻进较慢, 产状 $255^\circ \angle 10^\circ$ 。

2.1 滑坡基本特征

根据现场调查及钻探结果, 已查明滑坡的分布范围。其后缘裂隙至北西侧民房 2 院前, 东侧至民房 1 院, 南侧至管道施工便道前缘, 西侧至斜坡中部, 平面型态呈扇形。主滑方向为 150° , 横向与管道铺设延伸方向基本一致, 坡面平均宽度约为 200 m, 倾向长度约为 40 m, 平均厚度约为 5 m, 体积约为 $4.0 \times 10^4 m^3$ 。主要由输气管道施工便道开挖平场所导致, 属小型牵引式土质滑坡。根据威胁对象及现场地形地貌等特征, 将勘查区范围在平面上分为二段(滑坡 I 区、滑坡 II 区)分述如下。

2.1.1 滑坡 I 区

滑坡 I 区后缘裂隙至北西侧民房 2 前, 东侧至民

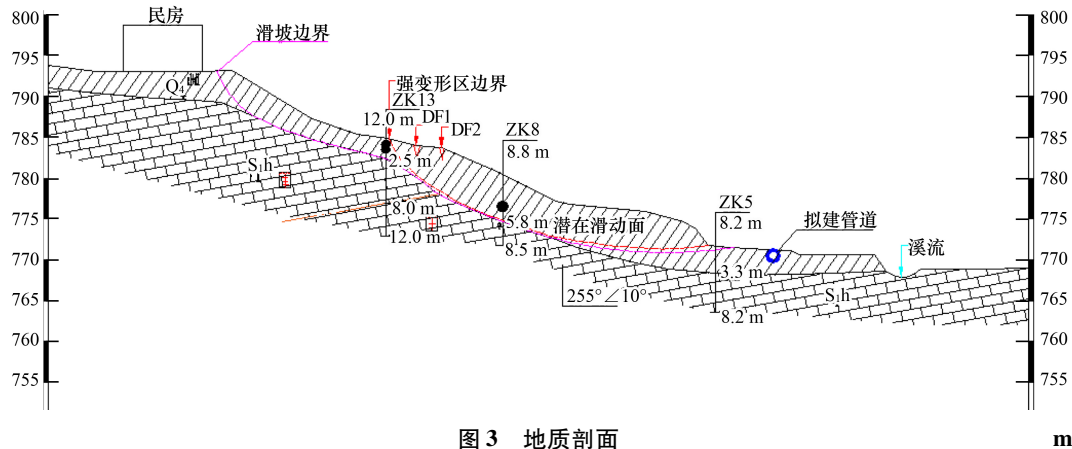


图3 地质剖面

m

房 1, 南侧至管道施工便道前缘, 西侧至乡间小路为界, 平面型态呈扇形。主滑方向约为 150° , 横向与管道铺设延伸方向基本一致, 平均宽度约为 120 m, 倾向长度约为 40 m, 平均厚度约为 5 m, 体积约为 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该区变形严重, 后缘地表已有拉张裂缝发育 (DL1、DL2), 并有位移下错现象, 错动距离约 5 cm, 前缘坡体发育有数条压致张拉裂缝 (DL3、DL4), 裂缝错动方向与滑动方向基本垂直坡脚处长期有水渗出。

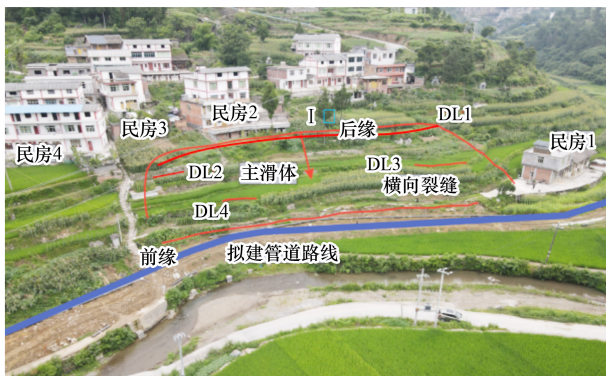


图 4 滑坡航拍照片 (I 区)

2.1.2 滑坡 II 区

滑坡 II 区后缘裂隙至北侧民房 5 前, 东侧至乡间小路为界, 南侧至管道施工便道前缘, 西侧至斜坡中部 (图 5), 平面型态呈扇形。主滑方向约 140° , 横向与管道铺设延伸方向基本一致, 平均宽度约为 80 m, 倾向长度约为 40 m, 平均厚度约为 5 m, 体积约为 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该区变形严重, 后缘地表已有拉张裂缝发育 (DL7), 并有位移下错现象, 错动距离约 3 cm, 前缘坡体发育有大体垂直等高线的压致张拉裂缝 (DL5、DL6), 坡脚处长期有水渗出。

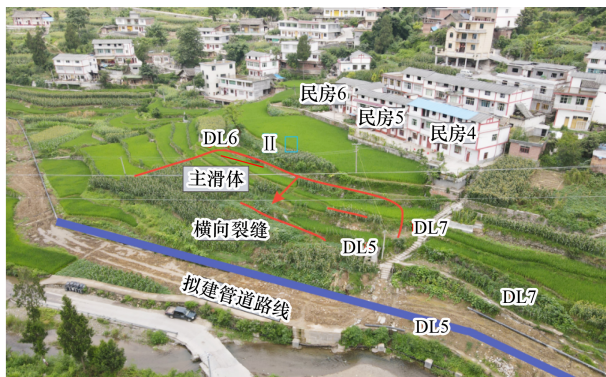


图 5 滑坡航拍照片 (II 区)

2.2 滑体、滑动面和滑床特征

根据滑坡勘查分区情况、结合现场调查及钻

探等成果资料, 分述如下。

2.2.1 滑坡 I 区

滑体物质主要由第四系含碎石红黏土组成, 滑体厚度约为 2.5 ~ 7.0 m。该区富含孔隙水, 在坡脚处长期有水渗出, 现场调查发现地表变形强烈, 且有继续加剧的迹象, 整体处于欠稳定状态。

2.2.2 滑坡 II 区

滑体物质主要由第四系含碎石红黏土组成, 滑体厚度约为 2.7 ~ 6.2 m。该区富含孔隙水, 在坡脚处长期有水渗出, 现场调查发现地表变形强烈, 且有继续加剧的迹象, 整体处于欠稳定状态。

(1) 滑动面: 滑坡区滑移面为第四系含碎石红黏土层与下伏基岩接触面, 下伏基岩岩性以强风化 - 中风化泥灰岩、石灰岩为主, 渗透性差, 大气降水后在岩土界面易发生积水, 不易排出, 滑带土受水浸泡后, 含碎石红黏土层底部饱水带强度降低, 性质变差, 抗剪强度降低。目前坡体浅表土层已发生局部滑移。坡脚因管道施工便道削坡形成不稳定斜坡面, 目前处于强变形阶段。

(2) 滑床: 根据钻孔揭露及工程地质剖面形态, 滑床主要由志留系下统韩家店组的强风化 - 中风化泥灰岩、石灰岩组成, 滑体形态呈折线形。

(3) 滑坡变形特征: 滑坡 2021 年 7 月开始发生变形, 根据现场调查, 至 2021 年 9 月, 位于坡体变形区后部的居民房屋墙体、地坪未发现有明显开裂现象, 但滑坡体局部地表拉裂下错, 表面已出现大小不一的 7 条裂缝 (DL1 ~ DL7), 裂缝特征如表 1 所示, 裂缝延展方向与滑坡滑动方向基本一致, 考虑强降雨的持续作用下, 滑坡有继续产生滑动破坏的可能。

本次选取 2-2' 和 5-5' 剖面进行计算, 采用传递系数法计算坡体在暴雨工况时的剩余下滑力, 计算模型如图 6 ~ 7 所示, 计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i+1}^n \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i+1}^n \psi_j) + T_n} \quad (9)$$

$$R_i = ((W_i + V_i) \cos \alpha_i - U_{bi} - Q_i \sin \alpha_i + P_i \sin (\alpha_i + \beta_i)) \tan \varphi' + c' + b_i \sec \alpha_i \quad (10)$$

$$T_i = (W_i + V_i) \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i - p_i \cos (\alpha_i + \beta_i) \quad (11)$$

表 1 裂缝特征

序 号	类 型	长度/m	宽度/cm	深度/cm	方向
DL1	拉张裂缝	90	5 ~ 10	5 ~ 30	滑坡滑动方向基本一致
DL2	拉张裂缝	30	5 ~ 20	10 ~ 20	滑坡滑动方向基本一致
DL3	拉张裂缝	15	2 ~ 5	2 ~ 8	滑坡滑动方向基本一致
DL4	拉张裂缝	26	3 ~ 8	2 ~ 10	滑坡滑动方向基本一致
DL5	拉张裂缝	35	3 ~ 8	5 ~ 15	滑坡滑动方向基本一致
DL6	拉张裂缝	10	2 ~ 5	2 ~ 8	滑坡滑动方向基本一致
DL7	拉张裂缝	14	2 ~ 8	5 ~ 12	滑坡滑动方向基本一致

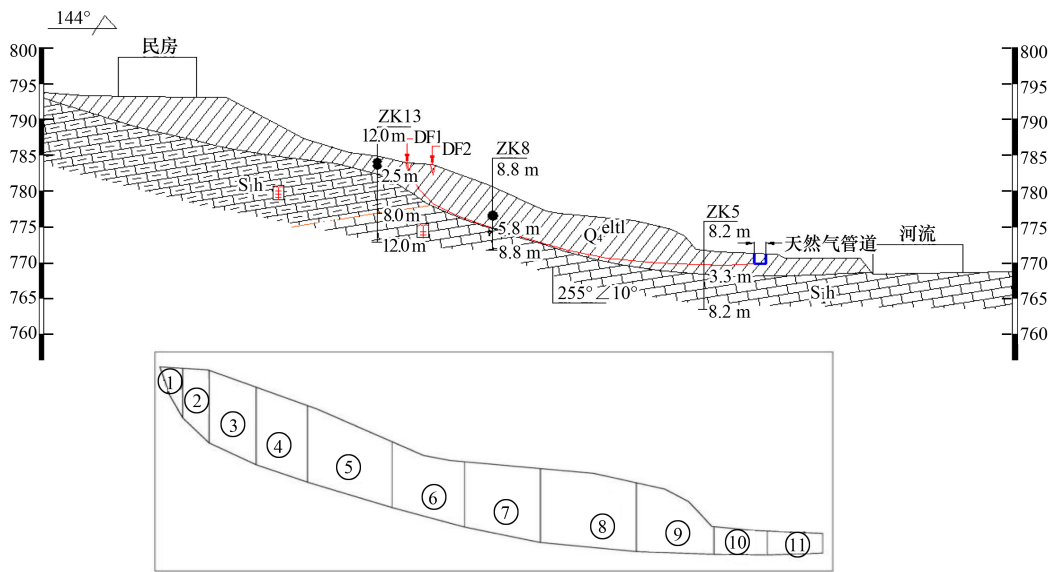


图 6 2-2'剖面折线形滑动计算模型

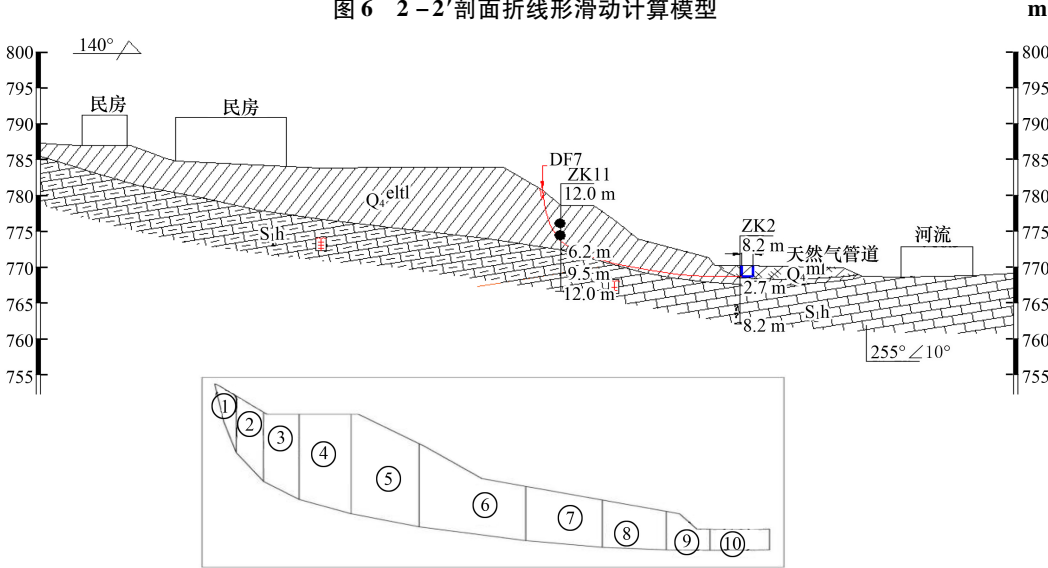


图 7 5-5'剖面折线形滑动计算模型

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi'_i / F_s$$

(12)

体抗滑力，kN/m； ψ_i 为第 $i-1$ 滑动条块对第 i 滑动条块的传递系数； T_i 为第 i 计算条块滑体下滑力，kN/m； W_i 为第 i 计算条块滑块条块重量，kN/m； V_i 为第 i 计算条块垂直向地震惯性力，

$$E_i = T_i - R_i / F_s + \psi_i E_{i-1}$$

(13)

式中： F_s 为滑坡安全系数； R_i 为第 i 计算条块滑

kN/m ; Q_i 为第 i 计算条块水平向地震惯性力, kN/m ; U_{bi} 为第 i 计算条块地面的孔隙水压力, kN/m ; P_i 为作用于第 i 计算条块外力, kN/m ; α_i 为第 i 滑动条块底面与水平面的夹角, $(^\circ)$; β_i 为第 i 滑动条块的外力 P_i 与水平线的夹角, $(^\circ)$; c'_i 、 φ'_i 为第 i 滑动条块底面的有效黏聚力 (kPa) 和内摩擦角 $(^\circ)$; b_i 为第 i 计算条块沿滑面的长度, m ; E_{i-1} 为第 $i-1$ 计算条块作用于第 i 滑动条块的推力, kN/m ; E_i 为第 $i+1$ 计算条块反作用于第 i 滑动条块的反作用力, kN/m 。

1) 滑体土: 为红黏土夹碎石, 重度取 $\gamma = 16.6 \text{ kN/m}^3$, 饱和状态下取 $\gamma_{\text{sat}} = 17.2 \text{ kN/m}^3$ 。

2) 滑带土: 天然工况下内聚力标准值 $c = 15.8 \text{ kPa}$, 内摩擦角标准值 $\varphi = 6.7^\circ$; 饱和工况内聚力标准值 $c = 12.7 \text{ kPa}$, 内摩擦角标准值 $\varphi = 5.4^\circ$ 。

3) 勘查区基岩为石灰岩, 根据本次岩样测试成果结合地区经验值, 中风化石灰岩的承载力特征值 $f_a = 4\,400 \text{ kPa}$ 。

选最不利剖面 5-5' 的剩余下滑力进行设计计算。

3 钢管桩支护设计计算

3.1 小口径组合抗滑桩间距

采用第一章节公式(1)~(4)确定小口径组合抗滑桩间距, 计算模型如图 8 所示。

本次计算取值 $D1 = 1.0 \text{ m}$; $D2 = 0.168$; $L = 3.0 \text{ m}$; $L_r = 6.0 \text{ m}$; $\gamma = 17.2 \text{ kN/m}^3$; $c = 12.7 \text{ kPa}$; $j = 5.4^\circ$ 。

计算结果: $g_1 = 3.314$; $g_2 = 0.331$; $B = 1.037$; $R_r = 284.48 \text{ kN}$, 最大滑坡推力 $P = 273.18 \text{ kN}$ 。满足 $P \leq R_r$ 的要求。

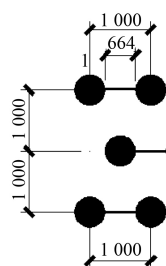


图 8 计算简图

mm

3.2 桩的总数及配筋量计算

采用第一章节公式(5)计算桩数及配筋量, 按沿滑面的抗剪计算桩的总数及配筋量^[7,8]计算。

计算结果: $n = 1.59$; $\tau_{fa} = 160.83 \text{ kN}$; $\beta_a = 0.240$; $E_s = 10 \text{ MPa}$, $E_t = 30\,000 \text{ MPa}$, $[\tau] = 180\,000 \text{ MPa}$; $A_s = 3.469 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。 E_s 、 E_t 分别为土体及小口径桩的弹性模量^[9]。实际工程取 3 排钢管桩, $3 > 1.59$ 满足要求。

上述设计计算未考虑混凝土抗剪强度, 鉴于此, 将混凝土抗剪强度根据建筑桩基技术规程(JGJ 94—2008)^[6]计算在内, 圆桩换算为方桩: $b = 0.8 \times 130 = 104 \text{ mm}$

$$v = 0.7f_t b h_0 \quad (14)$$

式中: v 为桩的抗剪力, kN ; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值, N/mm^2 ;

B 为桩截面长度, m ; h_0 为钢管桩计算宽度, m ;

计算结果: $v = 10.83 \text{ kN}$ 。

微型钢管桩全长 $H = 9.0 \text{ m}$, 微型钢管桩所能承受的剪力^[10]为

$$R = R_1 + R_2 = \pi d_1^2 \cdot [\tau]_1 / 4 + \pi (d_1^2 - d_2^2) \cdot [\tau]_2 / 4 \quad (15)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为浆体及钢管剪力, kN ; d_1 、 d_2 为钢管外径及钢管内径, 取值 $d = 146 \text{ mm}$, 130 mm ; $[\tau]_1$

表 2 剩余下滑力计算成果

灾害体	计算剖面	计算方法	计算工况	稳定系数	稳定状态	设计安全系数	剩余下滑力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	备注
I 区	剖面 2-2'	折线滑动法	工况 I	1.26	稳定	1.30	132.67 (第九滑块)	不满足设计安全系数要求
			工况 II	1.00	欠稳定	1.25	273.13 (第九滑块)	不满足设计安全系数要求
II 区	剖面 5-5'	折线滑动法	工况 I	1.14	基本稳定	1.30	161.04 (第九滑块)	不满足设计安全系数要求
			工况 II	1.01	欠稳定	1.25	236.89 (第九滑块)	不满足设计安全系数要求

注: 该滑坡防治工程安全等级为 I 级, 抗滑稳定设计安全系数取值如下:

工况 I (设计工况): 自重状态, 设计安全系数取 1.30;

工况 II (校核工况): 自重 + 暴雨, 设计安全系数取 1.25。

为浆体抗剪强度设计值, kPa; $[\tau]_2$ 为钢管抗剪强度设计值, kPa;

计算结果: $R = 639.46$ kN。

该公式未考虑对浆体及钢管抗剪强度进行折减, 故为了增加安全储备, 按照采用方法一进行计算。

故根据计算结果, 为了提高滑坡的稳定系数, 本次设计取三排钢管桩。为了提高安全储备, 钢管桩内插两根直径 32 mm 钢筋, 计算结果满足 $P = 273.18 \leq R_{fa} = 3 \times (160.83 + 10.83) = 514.98$ kN, 满足规范要求。

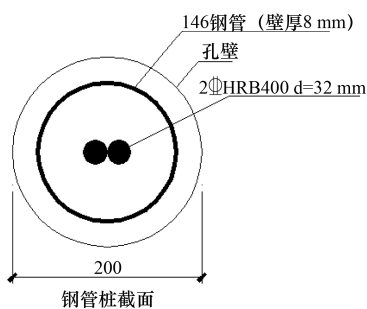


图9 钢管桩截面

3.3 微型钢管桩内力计算

微型钢管桩内力计算^{[11]~[12]}根据计算基准面上作用的垂直力, 弯矩、等价换算截面积, 等价换算惯性矩计算网状结构的最大压应力。以 $b = 1.15$ m 为计算单元, 计算采用第一章第一节公式(6)~(7):

本次计算 n 取 3; m_1 取值 300; m_2 取值 6.67; b 、 h 分别取值 1.15 m 及 2.0 m。

计算结果: $\sigma_R = 4.57$ kPa; $A_R = 169.613$ m²; $I_R = 33.716$ m⁴; $n = 3$; $\sigma'_R = 1371$ kPa; $f' = 310000$ kPa, 通过计算满足规范要求。

3.4 微型钢管桩内力计算

采用第一章公式(8)进行单桩水平承载

力特征值验算, 利用该公式验算单桩水

平承载力是否满足规范要求: $X_{0a} = 10$ mm; $\nu_x = 0.94$ (其中桩顶约束为固接考虑, $ah = 1.37 \times 6.4 = 8.8 > 4.0$, 取 0.94)

计算结果: $R_{ha} = 100.36$ kN。对于 3 排钢管桩, 水平承载力特征值为 $100.36 \times 3 = 301.08$ kN > 273.18 kN, 满足要求。

3.5 钢管桩嵌固段长度计算

钢管桩嵌固段长度计算^{[13]~[14]}

$$L_r = \frac{F_b \cdot A_c \cdot \sigma_R}{\pi D \tau_r} \quad (16)$$

式中: L_r 为小口径桩嵌固段长度, m; A_c 为小口径桩横截面积, m²; σ_R 为作用于砂浆上的压应力, kPa; F_b 为小口径桩抗拔安全系数, 取 2.5; D 为小口径桩直径, m, 取 0.146 m; τ_r 为桩与岩土体的黏结力设计值, kPa, 取 $\tau_r = 40$ kPa。

计算结果: $L_r = 3.3$ m, 考虑地下水等不利因素影响, 本次设计取 6.4 m, 其中嵌入中风化岩体约 1/3 桩长, 即 3.0 m。

综上: 微型钢管桩设计采用 3 排桩, 单桩钻孔直径 250 mm, 钢管直径 146 mm, 壁厚 8 mm, 桩间成“品字型”错开布置, 桩间距 1 m、排间距 1 m。钢管桩长 9 m, 嵌岩 3 m。顶部采用连接梁连接^[15], 桩长可按设计标高适当减小。

该项目钢管桩现场施工已经完成, 并通过验收, 施工照片如图 12~15 所示。近两年来, 通过对滑坡及桩顶位移进行长期监测, 滑坡及桩顶位移趋于稳定且满足规范要求, 证明钢管桩支护设计工作达到了阻滑的目的, 滑坡在支护后处于稳定状态。

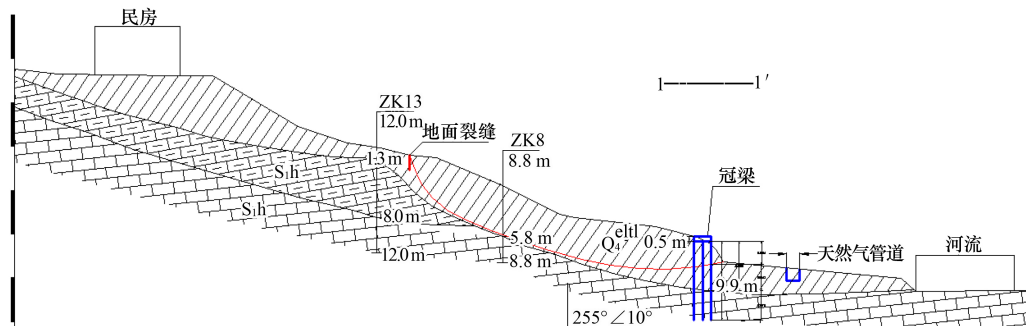


图10 钢管桩布置剖面

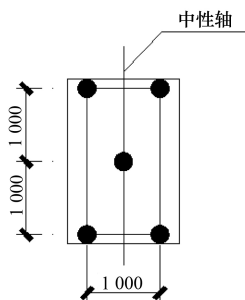


图 11 计算单位简图

mm



图 12 现场注浆



图 13 现场钻孔

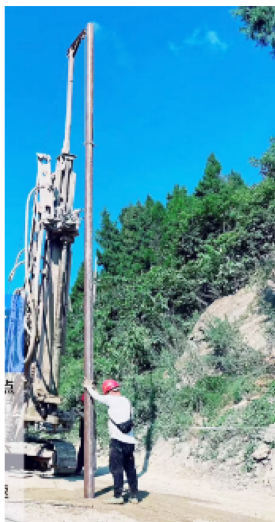


图 14 现场吊装钢管

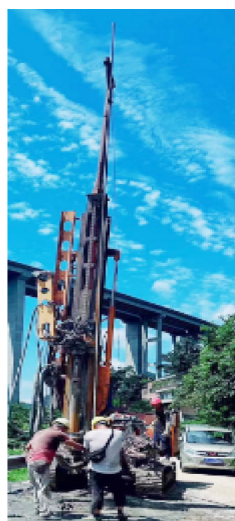


图 15 钢管内植入钢筋

完成施工后两年进行桩顶位移及滑坡位移进行监测, 监测结果表明, 滑坡变形得到有效控制且均满足规范要求, 为后续钢管桩设计提供参考。

(2) 本文采用作用于砂浆上的压应力而非最大压应力计算嵌固段长度, 对公式进行了改进, 使计算结果更符合实际情况。

(3) 该项目已经施工完成并通过验收满两年, 通过在桩顶设置变形监测点, 监测桩顶水平位移, 桩顶水平位移在 1~3 mm 之间, 依此说明该计算方法基本上是可行的、正确的, 在实际工程中具有指导作用, 可以作为类似工程的案例进行参考。

(4) 由于条件有限, 本文仅利用变形监测装置对桩顶水平位移进行监控量测, 最好的验证手段是在在桩身安装应变装置, 对桩身内力 and 弯矩的计算进行相应的推导, 得出实际状态下钢管桩的内力, 进而完善计算理论。

参考文献:

- [1] 俞振全, 钢管桩的设计与施工[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [2] 孙建平, 徐向东, 张鑫, 等. 微型桩托换技术[J]. 工业建筑, 1999, 29(8): 56-59.
- [3] 李征. 微型钢管桩边坡加固技术及其应用的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [4] 张录斌, 王仁鹏, 刘剑. 基于等效法的微型钢管组合抗滑桩设计方法[J]. 城市道桥与防洪, 2021(12): 177-179; 22.

(下转第 14 页)

4 结 语

(1) 本文将砂浆体抗剪考虑在内, 优化了设计并减少了工程量, 提出采用由位移控制的水平承载力特征值进行验算。结合实际工程, 对工程

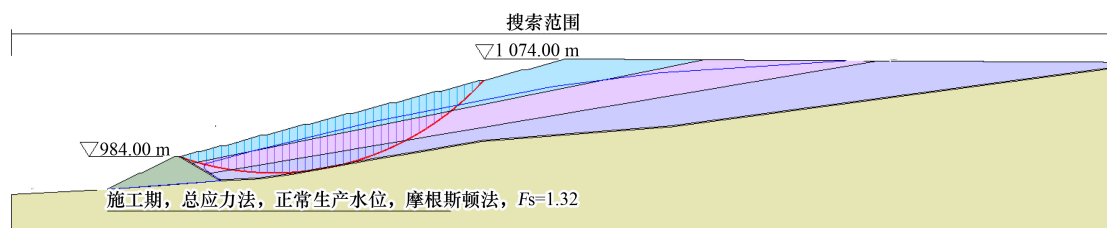


图 8 圆弧滑动面搜索结果

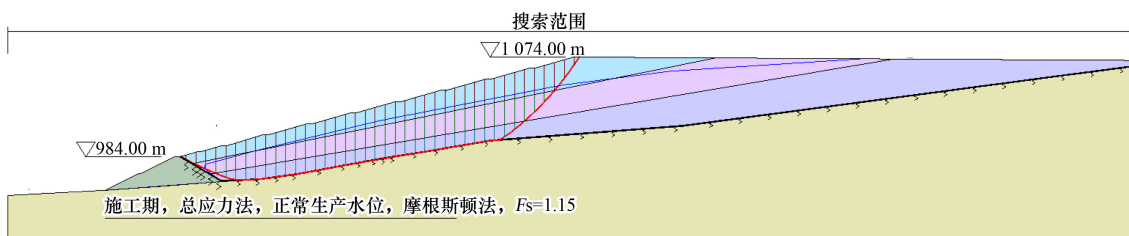


图 9 复合滑动面搜索结果

现的复合滑动面安全系数可能更小, 该种滑动不可忽视。本文对于铺膜防渗处理的尾矿库稳定性计算的处理方式可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 苏振宇. 三维边坡稳定有限元极限平衡法研究及应用[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- [2] 秦鹏飞. 极限平衡和数值方法在边坡工程中的应用[J]. 金属矿山, 2020(6): 6.
- [3] 尾矿设施设计规范: GB 50863—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [4] 朱建华, 刘石桥. 尾矿坝坝坡稳定计算荷载组合的探讨[J]. 工程建设, 2010, 42(1): 34—37.
- [5] 吴焕新, 王又武, 陈章友, 等. 关于垃圾填埋场安全性的相关问题探讨[J]. 工程建设, 2014, 46(3): 32—34.
- [6] 李炳华, 孙德才, 程博, 等. Autobank 软件在渗流稳定应用中的探讨[J]. 绿色环保建材, 2020(11): 2.
- [7] QIAN X, KOERNER R M. Stability analysis when using an engineered berm to increase landfill space[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(8): 1082—1091.
- [8] KOERNER R M, SOONG T Y. Stability assessment of ten large landfill failures [C]. Boston: GeoDenver 2000 Congress, 2000.
- [9] 李慈祥, 张峰. Autobank 在箱涵结构计算中的应用[J]. 绿色环保建材, 2020(6): 2.
- [10] 钱学德. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 施建勇, 雷省, SHI, 等. 考虑破坏面转移和垃圾坝作用的边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2014(6): 998—1004.
- [5] 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [6] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [7] 白晓宇, 苏杭, 张鹏飞, 等. 深基坑土岩界面微型钢管桩受力特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(11): 36—42.
- [8] 印长俊, 易丹萍, 龚家兴. 注浆微型钢管桩抗弯性能研究[J]. 应用力报, 2023, 40(5): 1125—1132.
- [9] 刘涛, 吴泽, 李智远. 微型钢管桩在山区综合管廊基坑支护中的应用[C]//. 2022 年工业建筑学术交流会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社出版发行, 2022.
- [10] 杨汉臣. 微型钢管桩在边坡治理中的应用及其机理分析[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [11] 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.
- [12] 薛承鹏. 微型钢管桩在边坡治理工程中的应用[J]. 福建交通科技, 2022(11): 11—13; 50.
- [13] 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(1): 47—50.
- [14] 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.
- [15] 黄伟钦. 微型桩在边坡支护中的综合应用[J]. 岩石力学与工程学报. 1998, 20(S1): 1218—1220.

(上接第 8 页)