DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20240708002

文章编号:1672-9331(2024)6-0053-13

引用格式:武贤龙,包小华,沈俊,等.抗滑桩加固挡坝力学特性及地下水影响研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(6):53-65. **Citation:** WU Xianlong, Bao Xiaohua, SHEN Jun, et al. Mechanical characteristics and groundwater effects of anti-slip pile-reinforced retaining dams [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2024,21(6):53-65.

抗滑桩加固挡坝力学特性及地下水影响研究

武贤龙1,包小华1,沈俊1,章宇1,曾毅2

(1.深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518060;2.上海市隧道工程轨道交通设计研究院,上海 200235)

摘 要:【目的】研究多排抗滑桩加固既有挡坝结构的力学特性,确定最有效的抗滑桩排数,并明确地下水影响下的多排桩加固薄弱区及适当的加固步骤,为多排抗滑桩在挡坝工程中的应用提供参考。【方法】自主设计了一套多排抗滑桩分级加载试验装置,以深圳市下坪垃圾填埋场堆体挡坝加固工程为背景,开展了无加固及单排、双排、三排抗滑桩加固坝体模型试验,并对比分析了不同加固方案下的桩体位移及内力分布。建立挡坝加固工程的全尺寸模型,对最不利地下水位影响下的坝体薄弱区进行数值模拟分析。基于库仑土压力理论,计算不同施工桩数下地下水位的控制要求,并结合工程实际给出合理的同步施工桩数。【结果】多排抗滑桩能够有效控制坝体位移,随着抗滑桩排数的增加,坝体逐渐呈现稳定状态;当抗滑桩数量由单排增加到双排时,桩体弯矩降低最为显著,继续增加至三排抗滑桩时,加固效果并无显著提升。同时,多排抗滑桩仅能对坝体下游进行有效加固,为了提升坝体的安全储备,应在坝体上游部位采取额外的加固措施。【结论】对于本工程而言,双排抗滑桩加固能够满足坝体的安全需求,但为了提供足够的安全储备,推荐采用三排抗滑桩加固方案,施工时采用跳挖作业,且最多同步施工5根抗滑桩。
 关键词:地基基础;多排抗滑桩;坝体加固;模型试验;安全系数;数值模拟
 中图分类号:TV3;TU473

Mechanical characteristics and groundwater effects of anti-slip pile-reinforced retaining dams

WU Xianlong¹, BAO Xiaohua¹, SHEN Jun¹, ZHANG Yu¹, ZENG Yi²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to study the mechanical characteristics of multi-row antislip piles for reinforcing the existing retaining dams, determine the most effective number of rows of anti-slip piles, and explore the weak zones reinforced with multi-row anti-slip piles and appropriate reinforcement steps under the influence of groundwater, so as to provide a reference for the application of multi-row anti-slip piles in retaining dam engineering. [**Methods**] A graded loading test equipment of multi-row anti-slip piles was designed. Under the background of the retaining dam reinforcement project of Xiaping Landfill, the model tests of unreinforced, singlerow, double-row, and triple-row anti-slip pile-reinforced dams were carried out. The pile

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52379104)

收稿日期: 2024-07-08;修回日期: 2024-08-07;接受日期: 2024-08-09

通信作者:包小华(1983—)(ORCID:0000-0002-5784-4277),女,教授,主要从事岩土与地下结构方面的研究。 E-mail:bxh@szu.edu.cn

displacement and internal force distribution of different reinforcement schemes were compared. Next, full-scale models of the retaining dam reinforcement project were established to numerically simulate and analyze the weak zones of the dams under the influence of the most unfavorable groundwater level. The groundwater level control requirement for different numbers of piles for simultaneous construction was calculated based on the Coulomb earth pressure theory, and the recommended number of piles for simultaneous construction was given according to the actual engineering practice. [Findings] Multi-row anti-slip piles can effectively reduce the displacement of the dams, and the dams are gradually stabilized with the increase in the number of rows of antislip piles. When the anti-slip piles are changed from a single-row to a double-row form, the bending moment of the piles is reduced most significantly, and the reinforcement effect is not significantly improved when the piles are changed to triple-row anti-slip piles. In addition, the multi-row anti-slip piles can only effectively reinforce the downstream part of the dams, and additional reinforcement measures should be taken in the upstream part of the dams to enhance the safety reserves of the dams. [Conclusions] For this project, double-row anti-slip pile reinforcement can meet the safety requirements of the dams, but a triple-row anti-slip pile reinforcement scheme is recommended for providing adequate safety reserves. Skip-excavation operation is recommended during the construction, with at most five anti-slip piles constructed simultaneously.

Key words: foundation; multi-row anti-slip pile; dam reinforcement; model test; safety factor; numerical simulation

Foundation item: Project (52379104) supported by the National Natural Science Foundation of China Corresponding author: BAO Xiaohua (1983—) (ORCID:0000-0002-5784-4277), female, professor, research interest: geotechnical and underground structures. E-mail: bxh@szu.edu.cn

0 引言

多排抗滑桩是由普通抗滑桩以及连接这些桩体的横梁共同构成的一个整体结构,可以实现对 土体推力的分段加固。由于多排抗滑桩具有桩位 布置灵活、抗滑能力强、适用范围广、施工简便、整体稳定性强、能够有效控制位移发展等诸多优点, 其被广泛应用于边坡、基坑、坝体、库区滑坡等工 程^[13]。然而,桩-土之间复杂的相互作用及不同 排桩之间传力机理的不明确性,导致其理论研究 仍远远滞后于工程应用。另外,关于多排抗滑桩 的设计计算目前仍无相关规范做出统一指导与说 明,导致其设计计算往往处于偏保守或不安全的 情况,随之带来的结果就是造成材料的浪费或存 在各种安全隐患。因此,开展多排抗滑桩的受力 特性及抗滑机制研究,对多排抗滑桩的合理设计 及施工具有重要的参考意义。

对于单排抗滑桩,其加固机理、加固效果已被 广泛研究[48]。对于多排抗滑桩,学者们在抗滑力、 组合形式、新型支护体系等方面开展了研究。薛 德敏等^[9]基于桩体位移与土工效应之间的相互关 系,建立了双排桩加固下的滑坡推力计算方法。 欧孝夺等[10]通过几何相似比为1:20的室内模型 试验,研究了h型抗滑桩的受力机制。李阳等[11] 开展了双排抗滑桩的模型试验,明确了双排抗滑 桩的双铰破坏模式。张海宽等[12]运用滑坡推力分 布函数及土体抗力分布函数对最危险滑体进行了 受力分析,推导出抗滑桩最大桩间距方程。吴红 刚等[13]通过室内模型试验研究了双排抗滑桩的极 限承载力及其变形破坏过程,为治理大型边坡滑 坡提供了参考。申永江等[14]提出了一种新的考虑 双排长短组合桩的前后排抗滑桩的滑坡推力计算 方法。SHEN 等^[15]开展了不同长短组合形式下的 双排桩的力学响应特性模型试验,验证了双排桩 对边坡位移控制的有效性。陈林靖等[16]研究了双

排桩竖向荷载和自由段长度对桩体位移和内力的 影响。SHANCGUAN等^[17]对不同排桩方式下的土 拱效应进行了数值模拟,模拟结果显示,不同排桩 方式会导致土体流变次数的改变。WANG等^[18]提 出了一种新型的双排桩支护体系,并通过模型试 验和数值模拟对这种支护体系的加固效果进行 了验证。

现有研究多关注双排抗滑桩,鲜有对三排及 以上抗滑桩体系的力学特性进行报道,同时抗滑 桩施工对原有地层扰动较大,如何在考虑地下水 的情况下给出多排抗滑桩施工的安全系数是关系 工程安全的重要问题。基于此,本研究以深圳市 下坪垃圾填埋场堆体挡坝为原型,设计了一套用 于多排抗滑桩分级加载的试验装置,对不同抗滑 桩排数下的桩体力学特性开展了研究,并进一步 通过数值模拟和理论解析的方式,给出了地下水 影响下的多排抗滑桩加固薄弱区和安全系数计算 方法,并与工程实际相结合,确定并推荐了适用的 抗滑桩加固排数和施工方案。本研究可为多排抗 滑桩在挡坝工程中的设计及应用提供参考。

1 多排抗滑桩模型试验

1.1 工程背景

深圳市下坪垃圾填埋场堆体挡坝位于一期堆体的最下游谷口处,挡坝内侧为一期垃圾堆积体,现有挡坝结构如图1所示。该挡坝为碾压土石坝,坝体材料主要为回填黏土,坝基为中风化砂岩,较破碎,属Ⅳ级围岩,坝基按照1:2.5放坡开挖。坝体长度为70m,坝底平均宽度为80m,最大坝基深度为22m。在坝体内部现存一排7根直径为2000mm的圆形钢筋混凝土桩-锚式抗滑桩,该排抗滑桩以"5+2"的形式组合,相邻抗滑桩通过压顶梁连接成为整体,最大桩长为25m,平均桩长为15m,锚体锚入基岩深度为8m。

随着垃圾堆积体逐渐增高,该挡坝坝体在长 期荷载作用下出现了过大变形,经评估认为坝体 有极高风险,存在较大安全隐患,需要对其进行加 固处理。经初步设计,计划采用多排抗滑桩对挡 坝进行加固,如图1(d)所示。桩底嵌入中风化砂 岩5m左右,桩顶设置梁板式连接体系,并通过植 筋与上游既有桩锚体系连接形成整体。本研究对 新增抗滑桩的加固效果进行前期验证,并评估地 下水对坝体稳定性的影响。



1.2 试验装置设计

为开展下坪垃圾填埋场挡坝多排抗滑桩加固的力学性研究,本团队自主设计了一套用于多排抗滑桩坝体分级加载的试验装置,如图2所示。该试验装置由模型箱、加载装置和数据采集系统组成。模型箱为由透明有机玻璃板制成的上端开口的长方形箱体,尺寸为1.0 m(长)×0.70 m(宽)×0.70 m(高)。模型箱底部采用双层结构,上层为可拆卸的高强铝板,中间用垫块支撑,根据抗滑桩的



布置情况在高强铝板上开孔来固定抗滑桩,以此 模拟桩底入岩的情况。加载装置由千斤顶、垫块、 螺栓、传力块和高强铝板组成,千斤顶被螺栓紧固 在垫块上,千斤顶推力通过传力块和高强铝板作 用于坝体。试验通过调整千斤顶推力来模拟坝 体的受力状态。数据采集系统由位移传感器、应 变传感器、土压盒和数据采集器4部分组成。位 移传感器被安装在桩体顶部用以测量桩顶位移; 应变传感器被等间距布设在桩体侧面,用来测量 桩体的结构应变;土压盒被安装在坝体内部靠近 加载端的一侧,用于监测加载过程中坝体的受力 状态;外接的数据采集器实时记录以上传感器 数据。

1.3 材料选取

1.3.1 土体材料

本次试验用土为该工程现场的坝体土样,通 过对土样进行一系列室内试验,获取其基本力学 参数,如图3所示。通过筛分试验获得土样的颗粒 级配曲线,如图3(a)所示,且测得土样不均匀系数 $C_{1}=12.5$,曲率系数 $C_{2}=0.6$,这说明该土样不均匀, 级配不连续。通过液塑限试验得到圆锥贯入深度 与土样含水率关系曲线,如图3(b)所示,且测得土 样塑限为18.45%,10 mm 贯入深度下的液限为 28.96%, 17 mm 贯入深度下的液限为 32.42%。通 过击实试验得到干密度与含水率关系曲线,如图3 (c)所示,且测得土样最优含水率为18.0%,对应的 最大干密度为1.77 g/cm3。通过直剪试验得到抗 剪强度与垂直压力的关系曲线,如图3(d)所示, 且测得土样黏聚力为 63.0 kPa,内摩擦角为 17.44°。另外,通过固结试验测得土样压缩模 量为4.567 MPa。土体各物理力学参数见表1。







表1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of so	Table 1	Physical a	nd mechanical	parameters	of soi
---	---------	------------	---------------	------------	--------

压缩模量/MPa	泊松比μ	黏聚力 c/(kPa)
4.567	0.3	63.0
天然含水率/%	天然密度 <i>p</i> /(kg·m ⁻³)	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)
24.0	1 914.0	17.44

1.3.2 桩体材料

本试验以1:100几何相似比进行设计,并以密 度相似为基本相似比来推导其他相似条件,挡坝 原型与模型物理量之间的相似关系见表2。原型

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

抗滑桩截面直径为2.0 m,弹性模量为37.4 GPa,抗 弯刚度为29.4×10⁶ kN·m²。根据挡坝原型与模型物 理量之间的相似关系,取模型桩截面直径为2.0 cm, 弹性模量为0.187 GPa,由于尺寸问题,模型桩的 弹性模量难以满足理论相似比。考虑到本研究重 点关注多排抗滑桩的整体加固效果,且在试验过 程中桩体主要处于弹性变形阶段,因此选用PA66 型尼龙材料制作模型桩,经测试该材料弹性模量 为2.27 GPa,模型桩抗弯刚度为273.0 N·m²,该抗 弯刚度与理想值相比,误差为7.1%,能够满足试验 要求。在模型桩制作时,因需要使用套帽和热熔 胶连接桩体和横梁,所以模型桩长度略长于试验

表2 挡坝原型与模型之间的相似关系

 Table 2
 Similar relationship between retaining dams and models

类型	物理量	相似关系	相似比
	应变 <i>ε</i>	C _s	1
	密度ρ	C_{ρ}	1
材料特征	应力 σ	$C_{\sigma} = C_{l}$	100
	弹性模量 E	C_E	100
	泊松比μ	C_{μ}	1
几何特性	长度1	C_l	100
	位移d	$C_d = C_l C_s$	100

要求的长度,以保障桩体和横梁之间的稳固连接。

1.4 试验方案

本试验共设计四种工况,工况统计及桩位布 置见表3。工况一为无抗滑桩工况,仅对土体进行 加载;工况二为设置单排抗滑桩工况,使用打孔钢 条连接同一排模型桩,用以模拟横梁的作用,并选 择1-4和1-6号桩为监测桩;工况三为设置双排抗 滑桩工况,使用钢条和螺栓模拟连接第一排和第 二排桩体的横梁,并新增2-4和2-8号桩为监测桩; 工况四为设置三排抗滑桩工况,连接方式与工况 三的相同,且新增3-3和3-7号桩为监测桩。在模 型表面布设3个位移传感器,其中1*位移传感器用 来监测加载板位移量,2*和3*位移传感器用来监测 第一排抗滑桩的位移。

挡坝模型使用取自现场的天然含水率为 24.0%的土体制作。在制作挡坝模型时,首先在模 型箱内部涂抹润滑油以减小土体与箱体的摩擦, 从而降低边界效应的影响。接着将粘贴了应变传 感器的模型桩安装在模型底板,应变传感器布置 情况如图4所示。然后对土体分四层并进行台阶 式压实,依据土体密度和压实体积,计算得到第一 层至第三层土体厚度均为5 cm,质量分别为51.9、

工况	排数	抗滑桩数量	试验图	桩位布置
工况一	0	0		40 40 18 17 35 第一排 第二排 第二排
工况二	1	7		单位:cm ^{単位:cm} ^{単位:cm} ^{単位:cm} 進接梁
工况三	2	7+10		<u>底板</u> (2) 40 1-7 2-9 3-8 ★监测桩 3-7 ★
工况四	3	7+10+8		2-7 · 3-6 ↓ 1 [#] 2-6 · 3-5 · 1-5 · 2-5 · 3-4 · 1-4 · 2-4 · 3-3 · 1-3 · 4 · 2-3 · 3-2 · 1-2 · 3 ⁷ · 2-3 · 3-2 · 1-1 · 2-1 · ·

表3 工况统计 Table 3 Working conditions

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

41.7和33.4 kg,第四层土体厚度为7 cm,质量为 35.4 kg,每层土体分两次压实,压实质量为该层土 体总质量的一半,共分8次压实,不同层土体之间 进行凿毛处理。最后,压实完成后取下砝码及挡 板,按照预定坡度进行削坡,并连接传感器,最终 制成的挡坝模型如图5所示。试验时,通过千斤顶 推动加载板实现对挡坝模型的分级加载,每级荷 载增量为0.5 kN,每级荷载施加完成后待采集仪 读数稳定再进行下一级加载。按照此方法,直至 模型发生破坏时停止试验,在此期间,应连续采集 并记录数据。



Fig. 4 Strain sensor layout



图5 挡坝模型制作过程

Fig. 5 Retaining dam modelling

2 试验结果分析

2.1 挡坝变形及桩顶位移

挡坝整体位移及桩体位移数据如图6所示,图 6(a)所示为四种工况下的挡坝整体位移情况。由 图6(a)可以发现,对于工况一,由于坝体内部未设 置抗滑桩,其变形趋势主要受土体的力学特性控 制,此时坝体的变形特征可分为三个阶段:第一阶 段,在推力为2000N前为压密阶段,此时位移为 0;第二阶段,当推力为2000~3200N时,土体处 于弹性变形和塑性变形阶段,此时位移开始均匀 增加,增量约为2mm,其中弹性变形更为明显;第 三阶段,当推力大于3200N时,土体处于整体滑 移破坏阶段。在经过弹塑性变形后,因坝体内部 无任何抵抗土体滑移的构件,坝体的滑移速度迅 速加快,最终导致破坏,此时的最大位移可达到 8 mm。对于坝体内部设置抗滑桩的工况,坝体抵 抗变形的能力随着抗滑桩排数的增加而增强。当 在坝体内部设置一排、两排和三排抗滑桩时,在推 力为5000N时,在坝体内部设置一排、两排、三排 抗滑桩时的坝体位移分别为10.10、3.50、1.36 mm, 这说明多排抗滑桩能有效提升坝体的承载能力。 就坝体位移减小而言,采用双排抗滑桩坝体位移 比采用单排抗滑桩的减小了 6.6 mm, 而采用三排 抗滑桩的坝体位移比采用双排抗滑桩的仅减小了 2.14 mm。由此可知,第二排抗滑桩对坝体位移的 减小具有最大的作用。

图 6(b) 所示为工况二、工况三和工况四下的 桩体位移情况。由图 6(b)可以发现,在相同推力



作用下,桩顶位移量随着抗滑桩排数的增加而减 小,位移-推力曲线呈现良好的线性关系,即坝体 整体处于弹性阶段,未发生过大的变形破坏。对 比分析三种工况下的桩顶位移发现:在7000N推 力作用下,当采用单排抗滑桩时,1-4、1-6号桩的 桩顶位移分别为15.49、15.63 mm;当采用双排抗 滑桩时,1-4、1-6号桩的桩顶位移为5.86、5.89 mm, 较采用单排抗滑桩时的分别减小了 62.17%、 62.32%,这表明采用双排抗滑桩加固对桩体变形 的控制效果十分显著;当采用三排抗滑桩时,1-4、 1-6号桩的桩顶位移分别为3.01、2.69 mm,较采用 双排抗滑桩时的分别减小了48.63%、54.33%,这 表明随着抗滑桩排数的增加,对第一排桩体变形 的控制效果会逐渐减小。相较于单排抗滑桩,采 用三排抗滑桩时,1-4、1-6号桩的桩顶位移分别减 小了 80.57%、82.79%,这也足以说明多排抗滑桩 的加固效果较单排抗滑桩的提升十分显著。

2.2 桩体弯矩分布

本研究根据桩体两侧应变数据,使用式(1)计 算桩体弯矩^[19],需要说明的是,在本研究中当桩体 变形与加载方向一致时的弯矩定义为正弯矩,反 之则为负弯矩。

$$M = \frac{Ew\Delta\varepsilon}{2} \tag{1}$$

式中:M为电阻应变片截面的弯矩;E为桩体材料 的弹性模量;Δε为模型桩同一截面桩前侧与桩后 侧所测应变之差;w为模型桩的抗弯截面系数。

图7为单排桩加固下的1-4和1-6号桩在不同 推力作用下的弯矩分布图。由图7可以发现,随着 推力的增加桩体弯矩逐渐增加,随着桩体深度的 增加,弯矩分布呈先增大后减小的变化趋势。在 相同推力作用下,1-6号桩的正弯矩要比1-4桩的 大,而对于靠近桩底的负弯矩,情况则相反。这种 差別在推力达到7kN时最为明显,造成这种差别 的主要原因是这1-4和1-6号桩所处群桩的规模不 同,1-4号桩与相邻4根抗滑桩通过横梁连接,相邻 抗滑桩能够有效分担变形荷载。此外,随着推力 的增加,弯矩的反弯点逐渐上移,这主要是受桩底 嵌入岩体作用的影响。以1-6号桩为例,当推力为 3kN时,桩体弯矩未出现反弯现象;而当推力增加 至7kN时,反弯点逐步上移至19.5 cm处。这表明 在更大的荷载作用下,桩体入岩端将发挥更明显





的作用。

图 8 为双排桩加固下的 4 根应变监测桩在不 同推力下的弯矩分布图。图8(a)为1-4和1-6号桩 的弯矩分布图,由图8(a)可以发现,双排桩加固下 的桩体弯矩分布与单排桩加固下的较为相似,不 同的是,1-6号桩的正负弯矩均比1-4号桩的大,即 此时1-6号桩为第一排桩受力最不利的桩。与单 排桩加固相比,双排桩加固下的第一排桩弯矩显 著减小,以7kN推力下的情况为例,在双排桩加 固下,1-4、1-6号桩的最大正弯矩分别为3.36、 5.35 kN·m,比单排桩加固时的分别减小了26.6% 和35.4%。2-4和2-8号桩体的弯矩分布如图8(b) 所示。由图8(b)还可以看出,第二排桩体长度为 20 cm,最大正弯矩位于桩身的8.5 cm处,随着推力 的逐渐增加,最大正弯矩的增加量要小于负弯矩 的增加量,即第二排桩主要依靠入岩端提供加固 效果,且其弯矩值整体比第一排桩的小,这表明此



(a) 第一排桩弯矩分布







时第一排桩起到主要的加固作用。

图9为三排桩加固下的6根应变监测桩的弯 矩分布图。三排桩加固下的第一排和第二排桩的 弯矩分布与双排桩加固下的类似,仅在弯矩数值 上有所差别,当推力为3kN时,桩体弯矩接近0, 三排桩对于提升坝体的承载能力有显著效果。对 于第三排桩,其弯矩分布不再呈"S"形分布,仅在 桩身上部局部出现正弯矩,这是由于此时第三排 桩的弯矩只受桩结构的影响,桩-土作用十分微 小。值得注意的是,在7kN推力作用下,3-3、3-7 号桩的桩底负弯矩分别为2.035、2.063kN·m, 比第二排桩的桩底负弯矩略大。

图 10 为各工况下的监测桩在 7 kN 推力作用 下的正负弯矩极值统计结果。由图 10 可以发现, 随着抗滑桩排数的增加,桩体弯矩极值呈逐渐下 降趋势。从单排桩加固变化到三排桩加固时,1-4



(a) 第一排桩弯矩分布









和1-6号监测桩的正弯矩平均减小50.0%,负弯矩 平均减小80.2%,这表明多排抗滑桩加固对于减小 挡坝位移,提高结构的安全性具有显著效果,同时 也表明多排抗滑桩加固对桩底最大负弯矩的影响 大于对桩中端最大正弯矩的影响。从双排桩加固 变化到三排桩加固时,2-4号桩的正负弯矩均减小 了约50.0%, 而2-8号桩的正弯矩仅减小了5.9%, 负弯矩则减小了87.3%,两者具有较大的差别,这 说明第一排桩的分布形式对相邻的第二排桩的荷 载分布具有显著影响。此外,在三排桩加固作用 下,2-4号桩的最大正弯矩小于最大负弯矩,而2-8 号桩的则完全相反,这表明其2-8号桩上很大一部 分内力传递到了第三排桩。对于三排桩加固而 言,第一排桩的弯矩最大,其次为第三排桩,第二 排桩的弯矩最小,这种分布规律是由推力与桩底 反作用力的相对大小所控制的。随着桩体与加载 板之间距离的增加,桩体受土体推力的作用逐渐 降低,第一排桩受推力最大,其弯矩分布呈"S" 形;对第三排桩而言,所受推力较小,因此具有 较小的正弯矩,其荷载来源主要为桩前土体的 反作用力和横梁结构传递的内力,这导致其变 形主要受桩底固定端的控制,因此具有更大的 负弯矩值。



图 10 桩体弯矩极值 Fig. 10 Extreme value of bending moment of piles

3 地下水位影响下的坝体稳定性分析

3.1 施工方案

根据前期室内模型试验结果,本文确定采用 三排抗滑桩方案对坝体进行加固。由于坝体加固 规模较大,桩孔剖面的面积总和也较大,加之施工 期间恰逢深圳市的雨季,坝体会受到较大的扰动, 桩前上游坝体易发生失稳破坏。因此,需要考虑 同时开挖桩数量和降雨条件,并对施工安全进行 验算。本研究拟在挡坝下游坡面新增19根截面尺 寸为1.5 m×2.0 m的方形抗滑桩,桩底嵌入基岩 5 m左右。为减小对原坝体的扰动,拟使用人工挖 孔成孔,并分两轮进行开挖施工。桩位的具体布 置如图11所示。



3.2 模型建立

首先,对最不利地下水位条件下的不同加固 方案稳定性开展研究。使用FLAC3D建立足尺的 挡坝排桩加固数值模型,如图12所示。模型尺寸 为252 m(长)×150 m(宽)×126 m(高),对模型的底 面及侧面施加法向位移约束,上部为自由面,不对 其施加位移约束。使用摩尔-库仑本构模型描述 坝体和基岩的力学特征,其力学参数来自于前期 的室内试验及地质勘查,见表4。使用桩单元、梁 单元和锚杆单元分别描述抗滑桩、横梁和锚杆的 力学性能,其中,桩单元与地层的实体网格之间通 过剪切和法向耦合弹簧实现相互作用^[20-23],各部 件的基本参数见表5。对模型边界透水条件进行

表4 地层力学参数

Tuble . Moonaniear parameters of strata						
地层	弹性模量/	近ねい	黏聚力/	摩擦角/	密度/(kg·	
种类	MPa	们们们	kPa	(°)	$m^{-3})$	
基岩	36.90	0.40	462	50	2 530	
山体	32.80	0.35	50	35	2 000	
挡坝1	6.85	0.30	63	17	1 914	
挡坝2	21.70	0.35	5	40	2 000	
堆体	1.30	0.30	20	25	1 500	

Table 4 Mechanical parameters of strata

表5 各部件参数

Table 5 Parameters of components

		-
部件	参数名称	参数值
	密度/(kg·m ⁻³)	2 500
	弹性模量/GPa	37.4
	泊松比	0.2
	切向黏聚力/kPa	10
桩单元	切向刚度/(GPa·m ⁻¹)	130
	切向摩擦角/(°)	20
	法向黏聚力/kPa	10
	法向刚度/(GPa·m ⁻¹))	130
	法向摩擦角/(°)	20
	密度/(kg·m ⁻³)	2 500
梁单元	泊松比	0.2
	弹性模量/GPa	10
	弹性模量/GPa	20
	横截面积/m ²	0.013
世打员二	抗拉强度/MPa	7.5
钿杆半儿	注浆弹性模量/MPa	20
	注浆黏聚力/MPa	1
	注浆摩擦角/(°)	25

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home





设置,模型左侧面设定为不排水界面,右侧面及前 后面则考虑向场外延伸,因此将其设定为排水界 面,模型底部设定为不排水界面,地下水位设定在 距离坝顶0.5 m处。由于堆体底部有防透水膜,因 此本次模拟过程不进行渗流分析,仅在考虑地下 水的影响下进行静力平衡分析。

3.3 坝体薄弱区分析

表6所示为数值模拟获取的不同加固方案下 的坝体位移及塑性区分布。由表6可以发现:单 排桩加固下的坝体整体位移最大,并且位移集中 位于坝体上游部位的堆体坡脚处,此处位移达到 了 0.500 m, 坝顶也出现了较大的位移, 达到了 0.065 m,此时坝体缺乏稳定性,需要进行加固处 理;当坝体内部存在双排和三排抗滑桩时,坝体 的位移显著减小,最大位移部位依然集中位于堆 体坡脚处,但坝顶位移分别减小至0.033、0.005 m。 由此可见,增加抗滑桩排数能够有效控制坝体的 整体位移,但对于坝体上游的加固效果不显著。 分析坝体的塑性区分布可以发现:在单排桩加固 下,塑性区集中分布于坝体的上游部位,除靠近 抗滑桩和下游坡脚部位外,其他区域均出现了明 显的塑性变形;而当采用多排桩加固坝体时,随 着桩排数的增加,下游坝体的塑性区明显减小。 由此可见,多排桩加固方案可有效增强下游坝体 的稳定性,但对上游坝体的塑性区影响很小。因 此,对于本工程而言,在下游增加多排抗滑桩仅 能起到增加坝体承载力的作用,为了进一步提升 坝体的稳定性和安全储备,建议在坝体上游,特 别是靠近堆体坡脚部位的塑性变形集中区域进 行注浆加固。



表6 坝体位移及塑性区分布

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

3.4 地下水影响下的挡坝安全系数计算

本文基于库仑土压力理论分析抗滑桩施工时 不同坡前地下水位对挡坝安全性的影响,计算简 图如图 13 所示。前期工程勘察资料显示,坝体重 度为 19 kN/m³,垃圾堆体重度为 15 kN/m³,坝体宽 度 b 为 70 m,坝底与基岩接触面的黏聚力 c=6 kPa, 内摩擦角 $\varphi=10^{\circ}$ 。其余计算所用的关键角度如图 13 所示,其中 $\alpha=12^{\circ}$, $\beta=68^{\circ}$, $\delta=68^{\circ}$ 。



图 13 安全系数计算简图 Fig. 13 Calculation of safety factor

下游挡坝的抗力计算式如式(2)所示:

$$F_{\rm f} = \tan \varphi \cdot G_{\rm HI} + cA_{\rm fc} \tag{2}$$

式中:F₁为下游挡坝的抗力;G_坝为坝体的整体质量;c为坝体与基岩接触面的黏聚力;A_底为坝底与 基岩的接触面积。

当垃圾堆体产生的推力与下游挡坝抗力在水 平方向平衡时,满足

$$F_{\rm f} = E_{\pm} \cos(90^{\circ} - 5^{\circ} - 22^{\circ}) + E_{\pm} \tag{3}$$

式中: E_{\pm} 为土体水平推力; E_{x} 为地下水压力。

由库仑土压力理论可得

$$E_{a} = \frac{G\sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \beta - \delta - \varphi)} = \frac{1}{2}\gamma H^{2} \frac{\cos(\beta - \alpha)\cos(\theta - \beta)\sin(\theta - \varphi)}{\cos^{2}\beta\sin(\theta - \varphi)\cos(\theta - \beta - \delta - \varphi)}$$
(4)

式中: E_a 为库仑主动土压力; γ 为垃圾堆体重度;H为坝体高度;G为坝体的自重。

令地下水位距离坝顶5m时为极限水位状态 (安全系数为1),则此时水压力为

$$E_{\pm} = \frac{1}{2} \gamma_{\pm} h^2 b \tag{5}$$

式中: γ_{*} 为水的重度;h为地下水位距坝顶的距离。

由式(3)可得

$$_{\pm} = \frac{F_{\rm f} - E_{\rm k}}{\cos 63^{\circ}} \tag{6}$$

当 $E_a = E_{\pm}$ 时,可得

E

$$K_{a} = \frac{\cos\left(\beta - \alpha\right)\cos\left(\theta - \beta\right)\sin\left(\theta - \varphi\right)}{\cos^{2}\beta\sin\left(\theta - \varphi\right)\cos\left(\theta - \beta - \delta - \varphi\right)} = 0.2795$$
(7)

式中:K,为库仑土压力系数。

解得*θ*≈29°。

当同时施工*n*根抗滑桩时,则在坝体宽度方向的折减系数为

$$\lambda = \frac{2.1n}{70} \tag{8}$$

则折减后的抗力为

$$F_{\rm f}' = (1 - \lambda)F_{\rm f} \tag{9}$$

此时水压力为

$$E'_{\pm} = F'_{\rm f} - E'_{\pm} \cos 48^{\circ}$$
(10)

则地下水位距离坝顶的高度为

$$h = \sqrt{\frac{2E'_{\star}}{70\gamma}} \tag{11}$$

根据以上公式,可获得在同时施工桩数不同 时,对地下水位的控制要求,具体见表7。

考虑到现场场地限制及降水能力,推荐最多 同时施工5根抗滑桩。在此条件下,计算地下水位 距坝顶不同距离时的安全系数,计算结果见表8。

表7 不同施工桩数时地下水位要求

 Table 7
 Requirements of groundwater level for different numbers of construction piles

同时施工桩数/根	折减系数	地下水距坝顶距离/m
5	0.15	13.49~16.67
6	0.18	17.71~16.89
7	0.21	13.94~17.13
8	0.24	14.18~17.36
9	0.27	14.43~17.61
10	0.30	14.69~17.87

表8	施工桩数为	5根时不同地	也下水位的安全	系数
----	-------	--------	---------	----

 Table 8
 Safety factor for different groundwater levels with five construction piles

	P	
施工桩数/根	地下水距坝顶距离/m	安全系数
5	13.49~16.67	1.00
	14.54~17.72	1.18
	16.29~19.47	1.57
	16.64~19.82	1.67
	18.04~21.22	2.06
	18.74~21.92	2.25
	20.14~23.32	2.58
	21.44~24.62	2.70

由计算结果可以看出,同时施工桩数越多,对 坝体扰动越大,对地下水位的要求越高。本文考 虑到施工期内可能的降雨条件,推荐安全系数控制 在1.2以上,地下水位距坝顶距离控制在15.0m以上 的方案,该方案能够保障足够的技术安全储备。

4 结论

本文通过自行研制的室内模型试验装置,开 展了不同排数的抗滑桩对既有挡坝的加固效果及 加固机理的研究。在选定抗滑桩排数的情况下, 基于数值模拟分析了多排抗滑桩加固的薄弱区, 并通过理论计算给出了同时施工桩数的控制要 求,主要结论如下:

 1)在试验加载过程中,无桩边坡试验破坏过 程表现为三个变形阶段,分别为压密阶段、弹塑性 变形阶段和破坏阶段。在不同排数抗滑桩加固 下,随着抗滑桩排数的增多,坝体逐渐呈现稳定状态,桩体位移逐渐减小。

2) 从单排桩加固到双排桩加固,第一排桩体的位移减小了约62.0%,1-4和1-6号监测桩的最大 正弯矩分别减小了26.6%和35.4%;从双排桩加固 到三排桩加固,第一排桩体的位移减小了约 50.0%,2-4号桩的正负弯矩均减小了50.0%左右, 而2-8号桩的正弯矩仅减小了5.9%,负弯矩则减 小了87.3%。随着抗滑桩排数的增加,坝体逐渐呈 现稳定状态,且双排抗滑桩方案加固效果提升最 为显著。

3)对于实际工程而言,三排桩加固方案不仅可以控制整个坝体结构的内力和变形,而且可以显著提高坝体下游边坡的稳定性,且对于后期填埋场扩容具有一定的安全储备。数值模拟结果表明,多排抗滑桩能够有效改善坝体下游的位移和塑性区分布,但对坝体上游的影响十分微小,建议对坝体上游采取额外的加固方案。

本研究通过模型试验、数值模拟和理论解析 研究了多排抗滑桩加固既有挡坝的力学特性。然 而,本研究仅考虑了抗滑桩排数和地下水的影响, 对于三排及以上抗滑桩而言,其加固效果不仅与 排数有关,还受抗滑桩排列形式的影响,这也是我 们下一步需要开展的重要研究内容。

[参考文献]

- REN Q Y, WANG F F, LIN X F, et al. Experimental investigation of crack propagation mechanism and loadbearing characteristics for anti-slide pile [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27 (6) : 2486-2496. DOI: 10.1007/s12205-023-1923-x.
- [2] HAN C X, HOU T S, CHEN Y. Three-dimensional slope stability and anti-slide pile treatment of Zhangjiayao landslide under rainfall [J]. Engineering Computations, 2023, 40 (9/10) : 2667-2692. DOI: 10.1108/ec-03-2023-0128.
- [3] 梁志荣,刘静德,李伟,等.复杂山地建筑边坡抗滑 桩加固技术应用研究[J].建筑结构,2021,51(23): 42-47,33.DOI:10.19701/j.jzjg.2021.23.008.
 LIANG Zhirong, LIU Jingde, LI Wei, et al. Application research of anti-slide pile reinforcement technology for complex mountain building slope [J]. Building Structure, 2021, 51(23): 42-47, 33.DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.23.008.
- [4] LIU X Y, CAI G J, LIU L L, et al. Investigation of internal force of anti-slide pile on landslides considering the actual distribution of soil resistance acting on anti-slide piles [J]. Natural Hazards, 2020, 102(3): 1369-1392. DOI: 10.1007/s11069-020-03971-4.
- [5] 雷正保,邢欢,孙汉正.桩基动力学模型参数反演识别方法[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):87-94.DOI:10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.01.011.
 LEI Zhengbao, XING Huan, SUN Hanzheng. A method of parameter inversion identification for dynamic model of pile foundation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1):87-94.DOI:10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.01.011.
- [6] 贺炜,陈宇林.土体震致剪切变形条件下斜坡桩的 受力特性[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2020,17(1):53-59.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.009.
 HE Wei, CHEN Yulin. Mechanical characteristics of slope piles under soil seismic shear deformation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020,17(1):53-59. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.009.
- [7] 刘平,王美静,张少强,等.抗滑桩桩位对边坡稳定 性影响机理的宏细观分析[J].中外公路,2023,43(3): 37-41.DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.005.
 LIU Ping, WANG Meijing, ZHANG Shaoqiang, et al. Macro and micro analysis of influence mechanism of anti-slide pile position on slope stability[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 37-41. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.005.
- [8] 刘雄,李立锋,周侨,等.h形抗滑桩室内模型试验 研究[J].公路与汽运,2023(1):64-68,74.DOI:

10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.013.

LIU Xiong, LI Lifeng, ZHOU Qiao, et al. Study on indoor model test of h-shaped anti-slide pile [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(1): 64-68, 74. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.013.

- [9] 薛德敏,李天斌,张帅.基于位移控制的双排桩桩后 滑坡推力计算方法[J]. 岩土工程学报,2023,45 (9):1979-1986.DOI:10.11779/CJGE20220687. XUE Demin, LI Tianbin, ZHANG Shuai. Method for calculating landslide thrusts behind double-row piles based on displacement control [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1979-1986. DOI: 10.11779/CJGE20220687.
- [10] 欧孝夺,唐迎春,崔伟,等.h型抗滑桩模型试验及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1936-1943.
 OU Xiaoduo, TANG Yingchun, CUI Wei, et al. Model test and numerical simulation of h-type anti-slide pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9):1936-1943.
- [11] 李阳,南亚林,贺海超,等.黄土双排抗滑桩模型试验[J].安全与环境学报,2022,22(3):1315-1322.
 DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0673.
 LI Yang, NAN Yalin, HE Haichao, et al. Research on model test of double row anti-slide piles in loess [J].
 Journal of Safety and Environment, 2022, 22 (3): 1315-1322.DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0673.
- [12] 张海宽,张友,刘涛,等.基于统一强度理论多层滑 坡体中抗滑桩最大桩间距研究[J].地质科技情报, 2017,36(5):209-215.DOI:10.19509/j.cnki.dzkq. 2017.0528.

ZHANG Haikuan, ZHANG You, LIU Tao, et al. Study on maximum pile spacing of anti-slide piles in multilayer landslide based on unified strength theory [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36 (5) : 209-215. DOI: 10.19509/j. cnki. dzkq.2017.0528.

- [13] 吴红刚,张乾翼,周张博,等.双排抗滑桩工作性能的模型试验研究[J].铁道工程学报,2015,32(9):49-54,78.DOI:10.3969/j.issn.1006-2106.2015.09.009.
 WU Honggang, ZHANG Qianyi, ZHOU Zhangbo, et al. Model test research on the working performance of double-row anti-slide pile [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9):49-54, 78.DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2015.09.009.
- [14] 申永江,杨明,项正良,等.柔性双排长短组合桩滑 坡推力的计算方法[J].岩土力学,2018,39(10): 3597-3602.DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0114.
 SHEN Yongjiang, YANG Ming, XIANG Zhengliang, et al. Calculation method of thrust force on the flexible double row long-short piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (10): 3597-3602.DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0114.

- [15] SHEN Y J, WU Z J, XIANG Z L, et al. Physical test study on double-row long-short composite anti-sliding piles [J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13 (4): 621-640. DOI: 10.12989/gae.2017.13.4.621.
- [16] 陈林靖,余其凤,郑俊.复合荷载作用下坡顶面双排 桩设计要素数值模拟[J].长沙理工大学学报(自然 科学版),2023,20(5):126-135.DOI: 10.19951/j. cnki.1672-9331.20220526001.
 CHEN Linjing, YU Qifeng, ZHENG Jun. Numerical simulation of design elements of double-row piles on slope top under composite load[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023,20(5): 126-135.DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220526001.
- [17] SHANGGUAN Y L, XUE D S, WANG G, et al. A study on soil arching effect of anti-slide pile considering different pile arrangements [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1195552. DOI: 10.3389/feart.2023. 1195552.
- [18] WANG R S, YANG H, NI P P, et al. Model test and numerical simulation of a new prefabricated double-row piles retaining system in silty clay ground [J]. Underground Space, 2023, 13: 262-280. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.004.
- [19] 刘洪佳,门玉明,李寻昌,等. 悬臂式抗滑桩模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2960-2966.
 DOI:10.16285/j.rsm.2012.10.040.
 LIU Hongjia, MEN Yuming, LI Xunchang, et al. Study of model test on cantilever anti-slide pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2960-2966.
 DOI:10.16285/j.rsm.2012.10.040.
- [20] ASIABSARY K F, HADIANI N, EGHBALI A H, et al. Investigating the efficiency coefficient of pile group in clay under two-way lateral load [J]. China Ocean Engineering, 2023, 37(5): 819-828. DOI: 10.1007/ s13344-023-0068-5.
- [21] BASU D, PRETELL R, MONTGOMERY J, et al. Investigation of key parameters and issues in simulating centrifuge model tests of a sheet-pile wall retaining a liquefiable soil deposit [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 156: 107243. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107243.
- [22] 邱志华.门架式抗滑桩土拱效应的数值分析研究
 [J].土工基础, 2018, 32(3): 318-321, 325.
 QIU Zhihua. Arching effect of the pile frames and its numerical simulations [J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(3): 318-321, 325.
- [23] LI T, XU P, YANG G Q. Investigation into bearing performance of concrete expanded-plates piles: field test and numerical modelling [J]. Engineering Structures, 2022, 271: 114954. DOI: 10.1016/j. engstruct.2022.114954.

(责任编辑:刘平;校对:毛娜)