

双排桩最优排距确定及桩间土压力计算方法

汤科, 赵华, 唐雪峰, 程儒淞

Determination of the optimal row distance for double row piles and the calculation method for earth pressure between piles

TANG Ke, ZHAO Hua, TANG Xuefeng, and CHENG Rusong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202402039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析

Improved calculation of the rigidity of double-row piles and double-beam composite support and displacement analysis under different soil properties

官凤梧, 刘晨, 郭文娟, 李晨光, 封占英, 张银铂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 109-116

考虑土拱效应及中主应力影响的桩间挡板土压力计算方法

A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress

尤静霖, 王士杰, 王昊岚 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 90-95

考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析

Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction

张玲, 朱幸仁, 欧强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 72-80

双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法

A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides

闫玉平, 肖世国 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 55-63

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

抗滑桩应变特征与内力非线性研究

A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile

任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 吴鑫培, 陈斌 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 114-124



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202402039

汤科, 赵华, 唐雪峰, 等. 双排桩最优排距确定及桩间土压力计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 104-113.
TANG Ke, ZHAO Hua, TANG Xuefeng, et al. Determination of the optimal row distance for double row piles and the calculation method for earth pressure between piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 104-113.

双排桩最优排距确定及桩间土压力计算方法

汤科¹, 赵华¹, 唐雪峰², 程儒淞¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059; 2. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室), 福建福州 350002)

摘要: 无连梁双排桩由于其复杂的受力特性和桩间土压力模型不统一导致较难应用于实际工程。为了深入了解双排桩的受力特性和快速计算出桩间土压力, 运用 GEO5 数值模拟软件研究桩排距对桩身受力的影响; 同时, 基于刚体极限平衡理论提出了一种简便计算桩间土压力的新方法, 即通过先求出前后排桩各自的剩余下滑力, 再分别去除前(后)排桩, 进而利用求解余下单排桩的剩余下滑力来辅助计算双排桩桩间土压力。结果表明: (1) 当桩排距在 $2b \sim 6b$ (b 为桩截面短边长) 时, 前后排桩剩余下滑力几乎相等, 但前后排桩最大内力差值却逐渐增大; (2) 随着桩排距的增加, 双排桩的推力之和呈现先增大后减小的趋势, 但前排桩桩后推力几乎不变, 这主要是由于后排桩桩后推力的变化所引起的, 双排桩的最优排距应在 $2b \sim 4b$ 之间; (3) 当桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, 双排桩中前排桩桩后推力等于同位置单排桩桩后推力和桩前抗力之和的一半; 后排桩桩前抗力等于同位置单排桩桩后推力和桩前抗力之和的一半, 最大误差也仅为 0.07%; (4) 通过与原方案及已有学者的研究成果对比分析, 其结果与前人研究成果基本吻合, 验证了本文计算方法的可靠性。研究结果对于快速确定双排桩的最优排距及桩间土压力的计算具有重要的参考价值。

关键词: 无连梁双排桩; 二元边坡; 刚体极限法; 最优桩排距; 桩间土压力

中图分类号: U213.1^{*}52.1; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0104-10

Determination of the optimal row distance for double row piles and the calculation method for earth pressure between piles

TANG Ke¹, ZHAO Hua¹, TANG Xuefeng², CHENG Rusong¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources (Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention), Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: The double-row pile system without a connecting beam is challenging to implement in practical engineering because of its complex load characteristics and the lack of a standardized model for soil pressure between piles. To better understand the stress characteristics of double-row piles and to efficiently calculate the inter-pile soil pressure, this study used the numerical simulation software GEO5 to investigate the impact of pile

收稿日期: 2024-02-28; 修订日期: 2024-05-14

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金项目(KLGHZ202101); 西藏自治区自然资源厅项目(藏财采 20200890-1)

第一作者: 汤科(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的研究。E-mail: 1450797228@qq.com

通讯作者: 赵华(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事结构工程和防灾减灾的研究工作。E-mail: zhaohua@cdu.edu.cn

row spacing on the stress of piles. In addition, a new method based on the theory of limit equilibrium of rigid bodies was proposed to calculate the soil pressure between piles easily. This method calculated the residual sliding forces of the front and back rows of piles separately, and then sequentially removed the front and back rows to calculate the remaining single-row pile residual sliding forces, which are used to calculate the soil pressure between the double-row piles. The results showed that when the spacing of pile rows is between $2b$ and $6b$ (b is the length of the short side of the pile section), the residual sliding force of the front and rear row piles is almost equal. However, the difference between the maximum internal force of the front and rear row piles increases gradually. As the pile row spacing increases, the sum of the pile thrust of the double-row piles initially increases and then decreases, while the thrust behind the front row of piles remains almost unchanged. This variation is primarily influenced by changes in the thrust behind the back row of piles. The optimal spacing for the double-row piles should be between $2b$ and $4b$. When the spacing of pile rows is between $2b$ and $6b$, the front pile rear thrust in double-row piles is equal to half of the sum of the single-row pile rear thrust and pile front resistance at the same position. Similarly, the rear pile front resistance is equal to half of the sum of the single row pile rear thrust and pile front resistance at the same position, with a maximal error of only 0.07%. Comparison with the original scheme and the existing studies shows that the results are consistent with previous findings, validating the reliability of the calculation method presented in this study. In conclusion, this study provides a valuable insight for rapidly determining the optimal spacing of double-row piles and calculating the soil pressure between piles.

Keywords: double-row anti-slide piles; binary slope; rigid body limit equilibrium method; optimal piles row distance; soil pressure between piles

二元土石边坡是指上部由松散的残坡积物、风积物、洪积物以及冲积物构成,下部为基岩的一类边坡,也被称为岩土混合边坡、堆积体(层)边坡和复合边坡^[1-4]。这类边坡中土岩接触部位(即基覆界面)的力学性能较差,尤其是在降雨持续入渗或地震扰动作用下,二元边坡极易演变为滑坡灾害,严重威胁到人民的生命财产安全^[5-7]。抗滑桩作为一种支挡结构,常被应用于二元边坡防治工程中,但当滑坡推力巨大,仅靠单排桩无法进行有效支挡或需要较大截面导致造价增加时,双排桩应运而生。作为一种新型支挡结构,双排桩因其侧向刚度大、能够承受更大滑坡推力等优势,在滑坡治理工程中得到了广泛应用^[8-9]。然而,目前对于无连梁双排桩最优排距的确定以及桩间土压力值的计算仍然依赖于相关从业者的经验。

近年来,众多学者对无连梁双排桩进行了理论研究和物理试验,旨在揭示双排桩的作用机制和受力特性。申永江等^[10]假设排间岩土体为弹塑性材料,提出一种弹塑性计算模型,基于结构力学知识、土的本构关系和数值分析等方法建立了一种计算前后排抗滑桩内力的计算方法;唐芬等^[11]通过建立有限元模型分析了不同排距下双排桩对推力的分担,并以双排桩的

推力和、稳定系数以及双排桩承担的推力差为目标,建立用于双排抗滑桩的多目标优化,从而优选出最优桩排距和推力分担;Zhu等^[12]利用温克尔弹性地基梁和体积比系数法,考虑顶梁刚度的影响,构建了双排桩的计算模型;杨波等^[13]探讨了双排抗滑桩在3种典型滑坡的计算与受力规律分析,得出了一系列关于双排桩合理受力与设桩位置的建议;Shen等^[14]通过物理模型试验,对双排长短抗滑桩体系进行了分析,研究了后排短桩对桩土相互作用的影响;范秋雁等^[15]利用弹性地基梁理论,建立了双排桩内力和变形计算方程,并通过工程实例进行了验证。此外,还有一部分学者采用数值模拟的方法对双排桩的特性进行了研究^[16-18]。

上述研究主要集中在建立合理的桩间土压力模型以及求解桩身推力分配等问题上,而对于桩排距的优化取值研究较少。同时,关于桩间土压力模型的建立与求解过程也相当复杂,涉及到弹塑性力学与有限元法计算^[19-20]。而在实际工程应用中,无论是公式计算还是有限元模拟,对于缺乏相关经验的从业者来说无疑都比较困难。

本文采用库伦 GEO5 软件的土质边坡分析模块,

针对四川省青川县昔草湾变形体这一二元边坡工程实例进行双排桩支护设计, 尝试利用不平衡推力法计算双排桩的桩身受力。鉴于抗滑桩的造价主要受制于桩截面和配筋量两个关键因素的影响^[1], 巧妙地利用这两个因素与桩身弯矩和剪力的直接关联, 通过综合考虑双排桩推力和桩身内力得出最优排距范围。同时基于刚体极限平衡理论提出了一种简便计算桩间土压力的新方法。由于后排桩后推力和前排桩前抗力可通过传统求解土压力的方法获得^[2], 通过简化模型求出前后排桩各自的剩余下滑力, 然后分别去除前排桩或后排桩, 进而利用极限平衡理论求解余下单排桩的剩余下滑力, 以此辅助双排桩的计算。推导出桩间土压力的简便计算公式, 并结合工程实例验证其有效性, 以期快速确定双排桩的最优排距及桩间土压力的计算提供参考和借鉴。

1 工程案例概况

昔草湾变形体位于四川省广元市青川县木鱼镇三社后山地段, 地形较陡, 植被茂密。该变形体主滑方向约 192°, 总体坡度约 40°, 整体形态呈“圈椅状”, 前缘潜在剪出口高程约 630 m, 后缘坡体顶部高程约 700 m, 发育多级陡坎, 陡坎部位一般都伴随有拉裂缝; 坡体上部宽约 50 m, 下部分布范围宽约 100 m, 纵向长约 100 m, 变形体面积约 7 000 m², 平均厚 13.5 m, 体积约 94 500 m³。区内出露地层主要为寒武系邱家河组 (ϵq) 岩层和第四系全新统 (Qh) 堆积层地层。其中, Qh 堆积层为人工耕植土层、残坡积层黏土和崩积碎块石土, 厚度一般为 3.5 ~ 8.4 m, 广泛分布于坡体表层; ϵq 岩层为全风化、强风化和弱风化绿泥石千枚岩, 该变形体工程地质剖面图如图 1 所示。

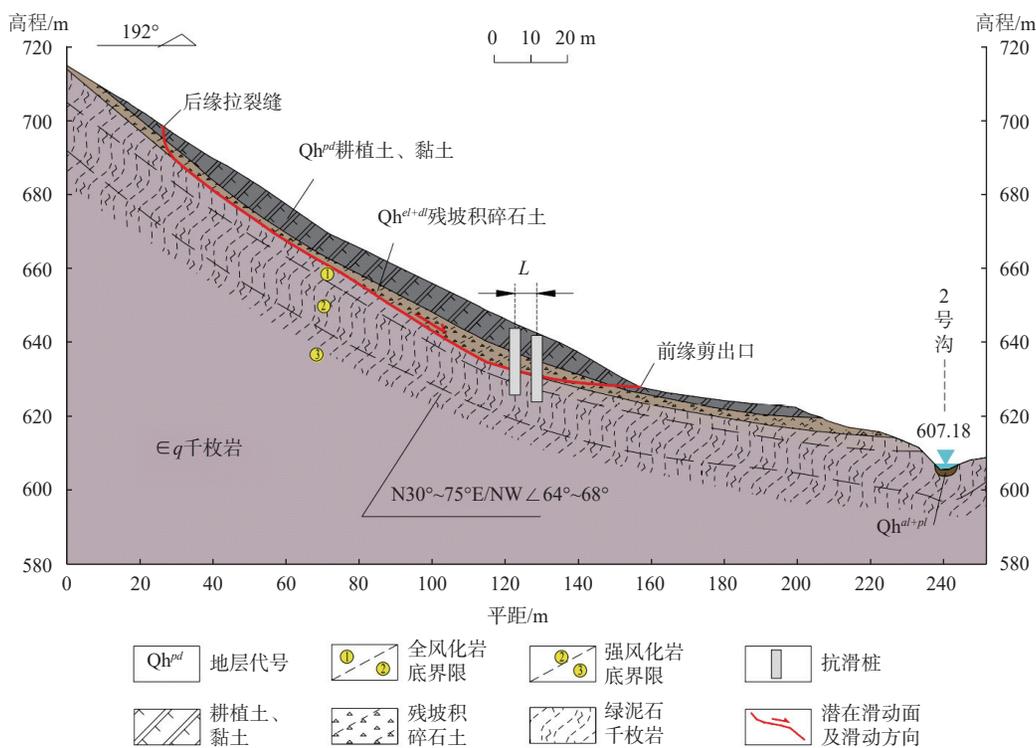


图 1 边坡工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile of slope

注: L 为桩排距。

该变形体后缘裂缝变形破坏迹象明显。后缘土体拉裂形成陡坎, 高 0.5 ~ 1.2 m, 变形体上部存在局部开裂、垮塌现象; 西侧冲沟内常年流水, 对侧缘形成冲刷, 造成变形体局部崩落破坏, 故存在失稳破坏的安全隐患。在边坡最初的抗滑桩设计与支护方案选择

阶段, 针对单排桩与双排桩支护方式进行了深入比较。最终, 考虑到双排桩具备对抗更大滑坡推力的显著优势而被采用。具体选用的抗滑桩参数包括截面尺寸为 3 m × 2 m, 桩长均为 18 m, 桩间距为 5 m, 桩排距为 6 m。

由于相关规范中并未提供双排桩加固边坡时桩身受力的精确计算公式, 只能参照基坑排桩的土压力公式进行粗略计算, 其准确性难以得到保证^[22]。故为了安全起见, 实际支护方案在计算桩身受力和截面配筋时将前后排桩视为相互独立的单桩, 这无疑增加了工程造价。为了解决上述问题, 本文运用数值模拟的方法, 确定二元土石边坡中无连梁双排桩的最优桩排距, 并为桩间土压力的计算提供依据, 同时将所得结果与原设计方案及已有学者的研究成果进行对比分析, 以验证其合理性。

2 边坡模型建立

为了能够认识不同排距下桩身受力的变化规律, 本文尝试采用库伦 GEO5 软件中的土质边坡分析模块对昔草湾变形体进行建模并采取双排桩支挡措施, 分析桩身及桩间土的受力情况。

2.1 库伦 GEO5 软件介绍

库伦 GEO5 岩土设计和分析软件共 34 个模块, 本文主要用到其中的土质边坡分析模块和抗滑桩设计模块, 土质边坡分析模块可以分析任意复杂土层的边坡稳定性。对于目标边坡, 首先用 CAD 中多段线勾划出剖面概化模型并另存为 DXF 文件, 导入该模块便可自动生成对应的数值模型, 然后根据实际土体参数对模型材料进行赋值, 其中滑动面可通过完全指定或自动搜索两种方式生成, 最后利用刚体极限法进行目标边坡的稳定性计算。

此外, 在土质边坡分析模块中可直接添加抗滑桩。本文数值模拟为了严格控制双排桩的排距, 采用坐标输入的方式添加排桩, 排桩参数与实际支护方案参数一致。在输入排桩后即可计算得到作用在桩上的滑坡推力、桩前抗力和滑面位置, 随后将这些数据直接导入到“抗滑桩设计”模块中, 进而求出抗滑桩的内力、变形和配筋等。

2.2 模型建立及参数选取

根据昔草湾变形体的工程地质剖面图可建立相应的滑坡体数值模型。为了叙述方便, 规定桩体靠近滑坡体前缘为前排桩, 靠近滑坡体后缘为后排桩。根据《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T 0219—2006)并结合原支护设计参数, 选用矩形截面桩, 桩截面尺寸为 $a \times b = 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, a 、 b 分别为桩截面长、短边边长, 桩间距为 5 m, 前、后排桩长均为 18 m, 相关岩土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

名称	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^\circ$)
滑体	20.2	33.8	20.8
滑带	21.2	31.0	19.0
滑床	24.0	2 500.0	30.0

注: 滑带和滑体为第四系人工耕植土层、残坡积层黏土与崩积碎块石土; 滑床为寒武系邱家河组绿泥石千枚岩。

3 无连梁双排桩最优排距确定

3.1 排距对桩身受力的影响

在 GEO5 土质边坡分析模块中, 主要利用不平衡推功法对双排桩的受力情况进行了计算, 包括前后排桩的桩后推力及桩前抗力, 并进一步分析在岩土体参数不变的情况下, 通过固定前排桩移动后排桩时不同排距双排桩桩身受力的差异。

本文将桩排距(L)的研究范围^[23]定为 $2b$, $3b$, \dots , $7b$, $8b$ 。所有排距下的边坡均保持稳定, 桩身受力的计算结果见表 2。从表 2 分析可知, 当双排桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, 前后排桩剩余下滑力基本没有变化; 当排距超过 $6b$ 之后, 前排桩剩余下滑力增加, 而后排桩剩余下滑力却减小, 这主要是由于地形坡度及桩间土体变化共同引起的。当排距较小时, 桩间土体较少且前后排桩所处滑面相对坡度变化小, 桩身受力的变化并没有太大变化; 随着排距的增加, 桩间土体增多且两桩所处滑面相对坡度变大导致桩间土体自重沿坡向的分力增大, 因此前排桩剩余下滑力也随之增加; 而后排桩由于桩间土体增多导致桩前抗力得以充分的发挥, 桩后推力的增幅不及桩前抗力, 故剩余下滑力有所降低。

表 2 双排桩桩身受力图

Table 2 Stress on double row piles

桩排距 /m	前排桩/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)			后排桩/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)		
	桩后推力	桩前抗力	剩余下滑力	桩后推力	桩前抗力	剩余下滑力
2b	1 273.99	1 116.85	157.14	1 636.01	1 480.31	155.70
3b	1 273.77	1 116.90	156.87	1 711.25	1 555.69	155.56
4b	1 273.71	1 116.92	156.79	1 791.33	1 635.57	155.76
5b	1 273.72	1 116.91	156.81	1 872.74	1 716.72	156.02
6b	1 273.81	1 116.89	156.92	1 955.46	1 799.06	156.40
7b	1 282.48	1 117.08	165.40	2 019.98	1 874.01	145.97
8b	1 282.90	1 116.98	165.92	1 939.28	1 793.76	145.52

3.2 最优排距确定

在实际滑坡治理工程中, 单根抗滑桩的费用动辄可达三四十万元^[1], 采用双排桩或多排桩则需要更高

的造价,在保证工程安全的前提下,如何降低抗滑桩的造价是岩土工程师们重点关注的问题。Feng 等^[24]和申永江等^[25]在这方面进行了一系列深入的研究。

抗滑桩的造价主要受制于两个关键因素:桩身截面面积和桩体配筋量,这两者都与滑坡推力的大小密切相关。当滑坡推力增大时,抗滑桩就需要加大截面或增强配筋来抵抗更大的滑坡推力,从而导致造价变高,因此在一定程度上,前后排桩总推力值越小,则抗滑桩总造价越低。此外,桩体配筋主要取决于桩身最大内力值,为了使得前后排桩都能达到最佳受力状态且不造成材料的浪费,便要求前后排桩桩身最大内力值(M_{max} 、 Q_{max})的差值应尽可能小。

根据以上分析,可以得出确定最优排距的 2 个依据:(1)前后排桩所承受的推力之和最小;(2)前后排桩各自的桩身最大内力值的差值最小。这样既保证了双排桩的总造价最低,又使得前后排桩都能充分发挥桩身强度而不造成浪费。表 2 中前后排桩受力情况随排距的变化规律如图 2 所示。

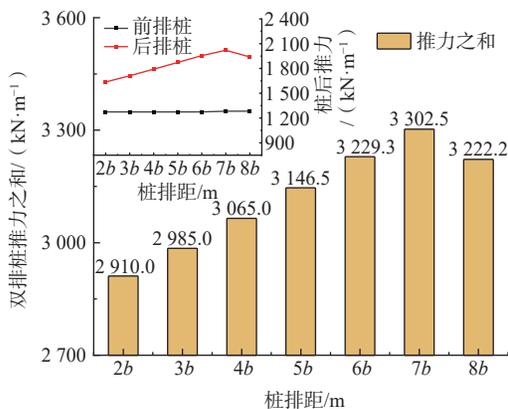


图 2 双排桩桩后受力情况随排距的变化
Fig. 2 Change of the force behind double row pile with row distance

从图 2 中可以看出:随着桩排距的增加,双排桩的推力和先增加后减小且前排桩桩后推力几乎不变,其影响主要是由后排桩桩后推力的变化导致的。同时后排桩的桩身受力变化程度超过前排桩,这表明排距增加主要对后排桩桩身受力产生影响。当排距处于 2b~7b 时,后排桩由于桩间土体增多以及桩后坡度变陡,桩身受力随之增大;前排桩由于桩间土体坡度较缓且桩位不变,故桩身受力变化并不明显;排距增加至 7b 后,推力和减小,两桩协同作用减弱,直至各自发挥单桩的阻滑作用。

通过调用 GEO5 的抗滑桩设计模块,便可获取前

后排桩桩身最大内力值。根据双排桩桩身最大内力值可计算并绘制出前后排桩的最大内力差值图(内力差值=后排桩内力值-前排桩内力值),结果如图 3 所示。

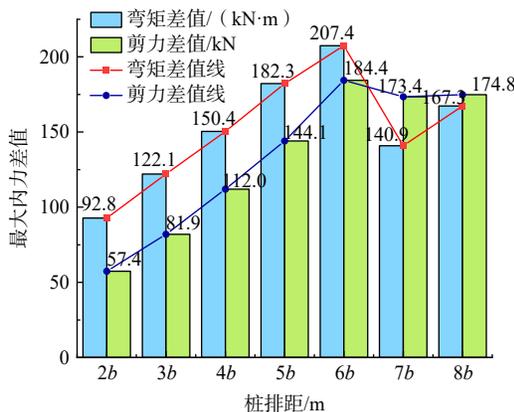


图 3 双排桩桩身最大内力差值
Fig. 3 Difference between maximum internal forces of pile

由图 3 可知,后排桩桩身最大内力值始终大于前排桩,这意味着后排桩相对于前排桩承担了更大的滑坡推力。当桩排距在 2b~6b 时,前后排桩最大内力差值逐渐增大,如统一配筋将会造成前排桩桩身材料的浪费;当桩排距大于 6b 后,前后排桩最大内力差值减小,然而根据图 2 可知滑坡推力和却达到最大,截面配筋总量和造价也随之增加。

根据上述研究分析,在双排桩截面尺寸保持不变的情况下,双排桩的最优排距范围应在 2b~4b 之间为宜。为了验证这一结论的可靠性,将其与已有的研究成果进行对比。申永江等^[26]利用有限元程序模拟得出采用双排桩时,桩排距不宜超过 4b;彭帅等^[27]通过数值模拟发现当桩排距为 4b 时,抗滑桩的土拱效应最为显著。孙涛等^[28]运用有限元软件 PLAXIS 模拟并结合济南某双排桩支护深基坑的实际监测数据,提出排距在 2b~4b 时支护效果最佳;邓飏^[29]通过 ANSYS 有限元软件详细分析了双排桩的桩顶位移以及桩身受力情况,得出最佳桩排距为 2~4 倍桩宽,王鹏斌等^[30]也得出了相同的结论。

从上述学者的研究成果来看,本文所得出的结论与他们的成果较为接近,这表明采用本文数值模拟分析得出的最优桩排距范围是有效的。

4 桩间土压力计算方法研究

目前,大部分文献对于桩间土压力计算的研究都以桩间土压力模型为基础^[31]。为了计算桩间土压力,首先要对桩身受荷段的受力状况进行详细分析(图 4)。

在此, 将桩身受荷段的受力形式简单地假设为垂直于桩身的均布荷载。

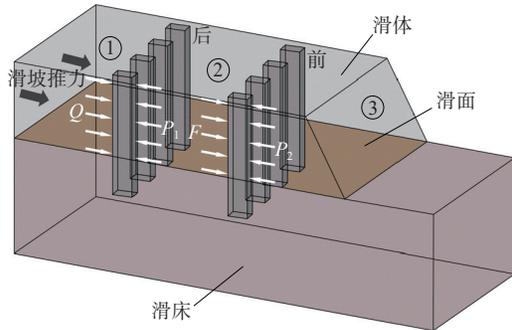


图 4 双排桩受荷段与滑体相互作用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interaction between loaded section and sliding body

从图 4 中可以看出, 桩体的受荷段主要承受 2 种力的作用, 即桩后推力 (Q 、 F) 和桩前抗力 (P_1 、 P_2)。前后排桩桩后推力主要是由桩后土体 (①、②) 对桩身的挤压作用产生的, 前后排桩桩前抗力则是由桩前土体 (②、③) 抵抗桩体变形产生的。当支挡时的土体达到极限状态时, 后排桩实际受到的桩后推力 Q 等于传统极限平衡法计算得出的推力, 前排桩受到的桩前抗力 P_2 也可以采用传统求解土压力的方法进行计算^[13]。因此, 双排桩支挡结构的计算难点主要在于桩排间土与前后桩体之间的相互作用力 (P_1 、 F) 难以量化。

本文根据刚体极限平衡理论, 提出了一种简便计算桩间土压力的新方法。具体思路如下: 首先双排布桩时求出前后排桩各自的剩余下滑力; 然后分别去除前(后)排桩, 得到余下单排桩的剩余下滑力; 最后将两次计算所得的下滑力求比值, 发现其规律联系, 并通过求解余下单排桩的剩余下滑力来辅助双排桩的计算。

根据上述思路, 具体可以将布桩方案划分为 3 种: (1) 双排布桩; (2) 仅布置前排桩; (3) 仅布置后排桩。为了便于叙述, 后文中将这 3 种方案简称为方案一、方案二和方案三。

按照 3.1 节的方法, 对这 3 种方案的桩身受力情况进行计算。其中方案一的计算结果见表 2。方案二由于前排桩的位置固定, 因此在所有排距下的桩身受力保持不变。经过计算, 方案二中桩体的桩后推力为 1 429.62 kN/m, 桩前抗力为 1 116.75 kN/m, 则剩余下滑力为 312.87 kN/m。方案三的计算结果见表 3。

进一步比较方案二、方案三与方案一的结果, 可以发现, 方案二中桩体的桩前抗力几乎保持不变, 但桩后推力有所增加, 这是因为去除后排桩后, 原本由

表 3 方案三桩身受力图

Table 3 Pile body stress in Scheme 3

桩排距/m	仅布置后排桩/(kN·m ⁻¹)		
	桩后滑坡推力	桩前土体抗力	剩余下滑力
2b	1 636.63	1 322.01	314.62
3b	1 711.80	1 397.55	314.25
4b	1 791.88	1 477.20	314.68
5b	1 873.29	1 558.03	315.26
6b	1 956.01	1 639.99	316.02
7b	2 018.30	1 706.76	311.54
8b	1 937.98	1 626.96	311.02

后排桩承担的大部分推力只能转移到前排桩上, 从而导致前排桩桩后推力增加。同样地, 方案三中桩体的桩后推力几乎保持不变, 但桩前抗力有所减小, 这是因为去除前排桩后两桩协同作用消失, 后排桩的桩前抗力体由原本的前排桩和桩前土体提供减少为仅由桩前土体提供, 因此后排桩的桩前抗力减小。

将方案一中前、后排桩的剩余下滑力分别与方案二和方案三中的剩余下滑力求比值, 并规定 α 为双排桩中前排桩剩余下滑力值/仅布置前排桩时的剩余下滑力值, β 为双排桩中后排桩剩余下滑力值/仅布置后排桩时的剩余下滑力值。计算结果见表 4。

表 4 不同排距下 α 、 β 值

Table 4 α 、 β values under different row spacing

桩排距/m	α	β
2b	0.502	0.495
3b	0.501	0.495
4b	0.501	0.495
5b	0.501	0.495
6b	0.502	0.495
7b	0.529	0.469
8b	0.530	0.468

从表 4 中可以看出, 当桩排距在 2b~6b 时, α 、 β 值几乎保持不变, 数值约为 0.5, 即方案二、方案三中的桩身剩余下滑力大约为方案一中相应桩体剩余下滑力的 2 倍。剩余下滑力等于桩后推力减去桩前抗力。根据图 4 所示, 方案一中前排桩桩后推力为 F , 假设方案二中桩体的桩后推力为 f , 则根据之前的分析可以得出 $2(F-P_2)=f-P_2$; 同理, 方案一中后排桩桩前土体抗力为 P_1 , 假设方案三中桩体的桩前抗力为 p , 则同样有 $2(Q-P_1)=Q-p$ 。经过整理可得:

$$F = \frac{f + P_2}{2} \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{Q + p}{2} \quad (2)$$

其中 f 、 P_2 、 Q 、 p 均易于求解, 值得特别指出的是, 上述关系式并未考虑桩桩和桩土的相互作用的影响, 且仅在排距为 $2b \sim 6b$ 时成立。

根据 3 种方案的桩身受力情况, 可以计算出 $(f+P_2)/2$ 和 $(Q+p)/2$ 的值, 为了更直观地反映出 F 与 $(f+P_2)/2$ 、 P_1 与 $(Q+p)/2$ 在数值上的差异性, 将其用差值百分比来进行表示, 计算结果如图 5 所示。

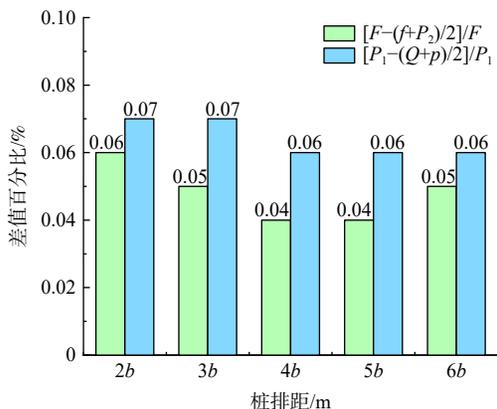


图 5 差值百分比图

Fig. 5 Difference percentage

从图 5 中可以看出, 当桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, F 与 $(f+P_2)/2$ 、 P_1 与 $(Q+p)/2$ 的数值几乎相等, 最大误差也仅为 0.07%, 从而证实了式(1)(2)的准确性。同时, 该公式的适用排距范围也涵盖了最优排距范围, 因此在最优排距内, 桩间土压力的计算也同样符合上述公式, 其产生的误差可忽略不计。上述公式所代表的含义为: 当桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, 双排桩中前排桩桩后推力等于同位置单排桩桩后推力与桩前抗力之和的一半; 后排桩桩前抗力等于同位置单排桩桩后推力与桩前抗力之和的一半。为了进一步验证本文方法的可靠性, 将本文方法得出的桩排间土压力结果差值百分比平均值与文献 [32] 的实例结果进行对比分析 (图 6)。从图中数据对比分析可以看出, 本文方法计算出的桩排间土压力结果差值百分比平均值与文献 [32] 所得出的结果基本吻合, 在不同排距下均保持不变, 文献 [32] 的最大差值百分比为 0.176%, 而本文的也仅为 0.065%, 这充分验证了本文方法的准确性和有效性, 并且相较于已有的相关研究成果, 本文方法计算桩排间土压力更为迅速便捷。

5 分析与讨论

本文针对昔草湾变形体这一工程实例进行了关于最优排距的确定及桩间土压力计算的深入分析和

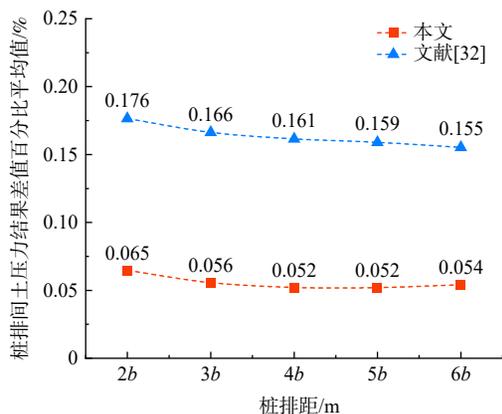


图 6 本文与文献 [32] 的差值百分比平均值对比图

Fig. 6 Comparison of the average percentage difference between this study and reference [32]

研究, 属于理论上的探讨与实践, 通过该实例主要探讨了以下几点:

(1) 通过对数值模拟结果的分析, 得出双排桩的最优排距范围为 $2b \sim 4b$ 。根据原支护设计方案中的桩截面尺寸可以得知, 该工程的最优排距在 $4 \sim 8$ m 之间, 可见原方案中排距定为 6 m 是合理的, 同时也验证了本文所使用的数值方法所确定的最优排距的有效性。利用本文提出的计算方法, 计算得到桩身受力后进行桩体配筋, 并将结果与原设计方案中的配筋量进行比较 (仅比较单桩纵筋量, 纵筋选用直径 36 mm 的 HRB400 级钢筋)。由于后排桩的受力大于前排桩, 因此在统一配筋时, 以后排桩的桩身受力作为依据。经过计算, 按照本文计算方法得出的单桩纵筋配筋量为 24 根, 相较于原设计配筋 (28 根) 减少了 4 根, 从而节约了工程造价, 因此该方法不仅可靠而且具有实际工程意义。

(2) 尽管本文仅讨论了桩截面尺寸和桩间距保持不变时的最优排距范围。但即使改变桩截面尺寸, 前后排桩的桩身受力几乎是不变的, 其值仅与桩位有关; 而改变桩间距大小, 排桩的桩后推力和桩身最大内力值也几乎呈现正相关变化, 因此这两个值的变化对于最优排距的确定来说并无太大影响。因此, 当桩截面尺寸与桩间距不变且符合规范要求时, 最优排距范围应在 $2b \sim 4b$ 之间。

(3) 关于第 4 节中桩间土压力值的简便计算方法, 尽管本文仅以甘草湾变形体这一实例来进行计算说明, 但在研究过程中, 作者通过多个概化模型以及其他工程实例进行了同样的计算, 发现该公式仍然适用, 因此可以将此结论视为一个普遍适用的半经验公式。值得注意的是, 该公式的适用范围, 排距最好在

$2b \sim 6b$ 之间, 超过 $6b$ 后其准确性可能无法保证。

在实际现场施工中, 关于双排桩的受力计算要么不考虑桩前抗力, 要么忽视其桩土协同作用, 将双排桩视为两排单桩进行计算, 这样无疑会增加工程造价。本文旨在为小排距双排桩的实际施工提供一种较为简便快速的求解桩间土压力值的方法。由于本文采用的是刚体极限平衡法, 计算结果可能与实际情况存在一定偏差, 但计算结果偏向保守。

6 结论

(1) 本文运用 GEO5 软件中的土质边坡分析模块, 利用不平衡推力法深入研究了无连梁双排桩桩排距对桩身受力的影响, 发现当桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, 前后排桩剩余下滑力几乎相等; 而当桩排距超过 $6b$ 之后, 前排桩剩余下滑力逐渐增大, 后排桩剩余下滑力则相应减小。

(2) 双排桩最优排距主要受到前后排桩所承受的推力之和以及前后排桩各自桩身最大内力值差值的影响。随着桩排距的增加, 双排桩的推力之和先增大后减小且前排桩桩后推力保持不变, 这主要是由于后排桩桩后推力的变化所引起的。当桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, 前后排桩最大内力差值逐渐增大; 而当桩排距超过 $6b$ 之后, 前后排桩最大内力差值逐渐减小。因此, 双排桩的最优排距在 $2b \sim 4b$ 之间为宜。

(3) 基于刚体极限平衡理论, 本文提出了一种简便计算双排桩桩间土压力值的新方法。当桩排距在 $2b \sim 6b$ 时, $F=(f+P_2)/2$, $P_1=(Q+p)/2$, 即双排桩中前排桩桩后推力等于同位置单排桩桩后推力和桩前抗力之和的一半; 后排桩桩前抗力等于同位置单排桩桩后推力和桩前抗力之和的一半, 最大误差也仅为 0.07%。

(4) 通过与原设计方案及已有学者的研究成果进行对比分析, 原方案排距合理, 但配筋量过多, 导致造价增加; 此外, 其最优桩排距和桩间土压力结果与前人研究成果基本吻合, 验证了本文计算方法的合理性和可靠性。因此本文提出的计算方法能够快速计算出桩身受力, 为实际工程提供了参考和借鉴。

参考文献 (References) :

- [1] 张钧, 梁为邦, 林红, 等. 二元结构库岸边坡失稳机制试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 156 - 163. [ZHANG Jun, LIANG Weibang, LIN Hong, et al. An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 156 - 163. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈泽松, 芮瑞, 夏元友. 二广高速公路怀集至广州段路堑边坡分类与加固优化 [J]. 中外公路, 2009, 29(6): 62 - 64. [CHEN Zesong, RUI Rui, XIA Yuanyou. Classification and reinforcement optimization of cutting slope in Huaiji-Guangzhou section of Erguang Expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(6): 62 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for slope design of water conservancy and hydropower project: SL 386—2007[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2007. (in Chinese)]
- [4] 魏永幸, 邱燕玲. 基于破坏机理与破坏模式的道路边坡分类浅析 [J]. 中国勘察设计, 2019(2): 80 - 82. [WEI Yongxing, QIU Yanling. Analysis of road slope classification based on failure mechanism and failure mode [J]. China Engineering & Consulting, 2019(2): 80 - 82. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 安雪莲, 密长林, 孙德亮, 等. 基于不同评价单元的三峡库区滑坡易发性对比——以重庆市云阳县为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1629 - 1644. [AN Xuelian, MI Changlin, SUN Deliang, et al. Comparison of landslide susceptibility in Three Gorges Reservoir Area based on different evaluation units: Take Yunyang County in Chongqing as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1629 - 1644. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 周金禄, 王明, 余长胜, 等. 藏东贡觉地区岩质滑坡多发性研究——以色拉滑坡为例 [J/OL]. 地质通报, (2024-07-05) [2024-09-20]. [ZHOU Jinlu, WANG Ming, YU Changsheng, et al. Study on multiple rock landslides in Gongjue area of eastern Tibet: Case study of Sela landslide [J/OL]. Geological Bulletin of China, (2024-07-05) [2024-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240704.1514.007.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 等. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究 [J]. 中国地质, 2021, 48(1): 21 - 39. [WANG Tao, LIU Jiamei, LI Zetong, et al. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning [J]. Geology in China, 2021, 48(1): 21 - 39. (in

- Chinese with English abstract)]
- [8] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [9] YU Yang, SHANG Yuequan, SUN Hongyue. Bending behavior of double-row stabilizing piles with constructional time delay[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2012, 13(8): 596 - 609.
- [10] 申永江, 邓飏, 杨明, 等. 门架式双排抗滑桩的弹塑性模型与计算分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 149 - 155. [SHEN Yongjiang, DENG Biao, YANG Ming, et al. Elastoplastic models and calculation analysis of portal double-row anti-slide piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup 1): 149 - 155. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 唐芬, 郑颖人, 杨波. 双排抗滑桩的推力分担及优化设计 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3162 - 3168. [TANG Fen, ZHENG Yingren, YANG Bo. Thrust share ratios and optimization design for two-row anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 3162 - 3168. (in Chinese with English abstract)]
- [12] ZHU Qingke, MO Haihong. Calculation method for retaining structures with double-row piles with the stiffness of the top beam being considered[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(12): 343 - 350.
- [13] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 237 - 244. [YANG Bo, ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, et al. Two-row anti-slide piles in three kinds of typical landslide computations and stress rule analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 1): 237 - 244. (in Chinese with English abstract)]
- [14] SHEN Yongjiang, YU Yang, MA Fei, et al. Earth pressure evolution of the double-row long-short stabilizing pile system[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(16): 586.
- [15] 范秋雁, 许胜才, 崔峰. 一类双排桩支护结构内力计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3152 - 3158. [FAN Qiuyan, XU Shengcai, CUI Feng. Calculation for a type of retaining structure with double-row piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup 1): 3152 - 3158. (in Chinese)]
- [16] 高长岭, 李荣峰, 柴建峰. 软岩钻孔灌注桩承载力的数值模拟 [J]. 中国地质, 2012, 39(3): 835 - 842. [GAO Changling, LI Rongfeng, CHAI Jianfeng. Numerical simulation of bearing capacity of the bored pile in soft rock[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 835 - 842. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 闫玉平. 越顶破坏模式下沉埋桩受荷段及沉埋段推力算法 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 76 - 84. [YAN Yuping. Calculation method of thrust force of the embedded stabilizing piles under the overtop-sliding failure mode[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 76 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李婷, 肖世国. 考虑土拱效应的抗滑桩桩间挡土板压力计算方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 85 - 91. [LI Ting, XIAO Shiguo. Calculation method of earth pressure on retaining plates between adjacent stabilizing piles considering potential soil arching effect[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 85 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 肖世国. 考虑桩间土体抗滑作用的单排抗滑桩受力计算方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 89 - 94. [XIAO Shiguo. A calculation method for one row stabilizing piles considering resistance of soil between adjacent piles[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 89 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [20] YAN Yuping, XIAO Shiguo. A calculation method for the embedded depth of stabilizing piles in reinforced slopes[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, 44(7): 1077 - 1092.
- [21] 王峰, 曹文贵. 考虑界面应力分布不均匀影响的挡土墙主动土压力分析方法 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 82 - 89. [WANG Feng, CAO Wengui. An active earth pressure analysis method of retaining wall considering the influence of uneven interfacial stress distribution[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 82 - 89. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 尤静霖, 王士杰, 王昊岚. 考虑土拱效应及中主应力

- 影响的桩间挡板土压力计算方法[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 90 - 95. [YOU Jinglin, WANG Shijie, WANG Haolan. A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 90 - 95. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 曾金珍. 门式双排抗滑桩受力特性分析及优化设计[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. [ZENG Jinzhen. Analysis of stress characteristics and optimization design of portal double row anti slide pile[D]. Changsha: University of Science & Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [24] FENG Xiating, ZHAO Hongbo, LI Shaojun. A new displacement back analysis to identify mechanical geo-material parameters based on hybrid intelligent methodology[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(11): 1141 - 1165.
- [25] 申永江, 黄立, 严克伍. 悬臂双排桩排距的计算方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 59 - 63. [SHEN Yongjiang, HUANG Li, YAN Kewu. Calculation method of the piles row distance of cantilever double-row anti-slide piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 59 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 申永江, 吕庆, 尚岳全. 桩排距对双排抗滑桩内力的影响[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1033 - 1037. [Shen Yongjiang, LV Qing, SHANG Yuquan. Effect of pile row distance on internal force of double-row anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 1033 - 1037. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 彭帅, 汪华斌, 周博, 等. 基于抗滑桩土拱效应形成的细观数值模拟[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1993 - 2000. [PENG Shuai, WANG Huabin, ZHOU Bo, et al. Microscopic numerical modeling research based on the formation of soil arching effect[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 1993 - 2000. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 孙涛, 刘俊岩, 刘燕. 双排桩支护排距的优化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 616 - 620. [SUN Tao, LIU Junyan, LIU Yan. Optimal row distance of retaining structure with double-row piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(Sup 1): 616 - 620. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 邓飏. 门架式双排抗滑桩模型试验及计算方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. [DENG Biao. Model test and calculation method research on portal double-row anti-slide piles[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 王鹏斌, 阎长虹, 万佳佳, 等. 门架式抗滑桩设计参数优化与桩体变形分析[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 195 - 204. [WANG Pengbin, YAN Changhong, WAN Jiajia, et al. Design parameter optimization and deformation analysis of portal anti-slide pile[J]. *Geological Review*, 2022, 68(1): 195 - 204. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 邓时容, 肖世国. 嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 84 - 91. [DENG Shirong, XIAO Shiguo. Calculation method of stabilizing piles with broadened top at the built-in section[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 84 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 55 - 63. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 55 - 63. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真