

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-10

闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩后侧推力分布物理模型试验 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 79-87.

YAN Yuping, XIAO Shiguo. Physical model test on landslide thrust distribution on double-row stabilizing piles[J].

The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 79-87.

双排抗滑桩后侧推力分布物理模型试验

闫玉平¹, 肖世国²

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都 610031;

2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室(西南交通大学), 四川 成都 610031)

摘要: 双排抗滑桩后侧滑坡推力分布是其设计中要考虑的关键要素之一。针对一大型基岩-覆盖层式滑坡, 进行四组不同后排桩布设方式的双排桩加固滑坡的室内物理模型试验, 通过采用坡体外注水, 经过特定通道渗入滑带的方法来模拟强降雨条件对滑带的软化效应, 测得不同工况下两排桩后侧滑坡推力分布特征, 并通过 FLAC^{3D} 数值模拟方法对试验结果进一步验证。试验结果表明, 后、前排桩上坡体压力均呈两端小、中间大的抛物线型分布模式且峰值点相对靠近滑面位置; 桩位不变时, 后桩后侧坡体压力峰值随沉埋深度增大而减小且峰值点位置上移, 前桩后侧坡体压力峰值随后桩沉埋深度增大而增大, 但峰值点位置无明显变化; 滑带软化效应并不改变双排桩上推力分布模式, 但会增大前、后排桩后侧坡体压力, 且相比桩顶和底部, 桩身中间部分坡体压力增加幅度较大; 注水软化前后, 后、前排桩上坡体压力分别增大 14.3%~21.4% 与 17.9%~24.8%。

关键词: 滑坡; 双排桩; 推力分布; 物理模型试验; 滑面软化效应

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)02-0079-09

Physical model test on landslide thrust distribution on double-row stabilizing piles

YAN Yuping¹, XIAO Shiguo²

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education (Southwest Jiaotong University), Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Distribution pattern of thrust force on double-row stabilizing piles is one of the essential factors for the design of stabilizing piles. For a bedrock-overburden landslide strengthened with double-row stabilizing piles, four sets of laboratory physical model test are conducted considering various rear-row pile configurations. In particular, slip surface softening effect due to heavy rainfall is physically simulated using external water injection and infiltration into the shear band through a special channel. Distribution characteristics of the landslide thrust on the two piles are measured, which is further verified by a numerical simulation method FLAC^{3D}. The test results show that the thrusts on the rear and fore piles present a parabolic distribution pattern, and the location with peak value is relatively close to the slip surface. If the pile location remains unchanged, the peak value of the thrust force behind the rear pile decreases with the increase of its embedded depth and the

收稿日期: 2021-04-27; 修订日期: 2021-07-16

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578466)

第一作者: 闫玉平(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事边坡稳定性分析与加固方面的工作。E-mail: 2420907827@qq.com

通讯作者: 肖世国(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事边坡稳定性与支挡结构方面研究工作。E-mail: xiaoshiguo@swjtu.cn

position with peak value moves upward; while the peak value of the thrust behind the fore pile increases with the embedded depth of the rear pile top, and the position with peak value changes unobviously. The slip surface softening effect does not change the distribution pattern of the thrust forces on piles, but it can increase the thrusts behind the piles; compared with the top and bottom of the piles, the increase of the thrust in the middle part of the piles is relatively larger. The thrust forces on the rear and fore piles under external water injection are about 14.3%~21.4% and 17.9%~24.8% higher than those before the softening action, respectively.

Keywords: landslides; double-row stabilizing piles; thrust distribution; physical model test; slip surface softening effect

0 引言

基岩上覆堆积体式滑坡(简称基覆式滑坡)在我国西南地区分布较为广泛^[1],降雨入渗可导致基覆界面表现软化特性,该界面是潜在的危险滑面^[2-3]。双排全长桩及后排沉埋-前排全长桩越来越多应用于此类大型滑坡的工程治理^[4-8]。其中,两排桩后侧推力分布模式及大小是工程设计中的关键要素之一。

对于双排抗滑桩的后排桩,其桩后滑坡推力与普通单排桩相同。戴自航^[9]在三种滑坡推力分布模式的基础上,分析抗滑桩模型试验和现场试桩资料,指出滑体为散体或黏土时滑坡推力合力作用点降低,存在抛物线型分布模式。肖世国^[10]针对滑体为土体或软弱、破碎或松散的岩体的拟土质边坡,采用水平微层段极限平衡法分析,得到桩后滑坡推力分布模式具有中间大上下端小的近似抛物线型特征。Ito等^[11]基于桩间土拱效应与Mohr-Coulomb弹塑性模型,给出了桩后滑坡推力算法,较适合软弱土体情况。Randolph等^[12]针对侧向荷载作用下柔性桩,通过有限元方法,将滑体视为土体模量呈线性变化的弹性连续体,给出了反映群桩效应的侧向推力量化表达式。

我国铁路规范^[13]中对于单排抗滑桩后侧推力,基于试验给出了三角形或矩形分布模式,属于近似经验模式。熊治文^[14]在深埋式抗滑桩模型试验和相关数值模拟分析的基础上,得出桩后滑坡推力分布形式基本呈矩形。雷文杰^[15]通过大型室内沉埋桩模型试验,得出桩身所受的滑坡推力与桩顶滑体所承担推力之间的关系。郑颖人等^[16]遵循桩后侧土压力与极限平衡法推力大体相当的前提,采用有限元强度折减法,得到滑坡推力的大小和分布模式。宋雅坤等^[17]采用有限元方法,对系列室内大型沉埋式抗滑桩模型试验进行数值模拟,算得桩后及桩顶推力的分布模式与大小。

这些针对单排抗滑桩后侧推力分布的研究结果,可为实际工程设计提供依据。然而,其并未针对双排抗滑桩,特别是未必适合双排桩中的前排桩后侧推力分布。

申永江等^[18]运用极限平衡理论和土拱理论分析了双排桩的受力模式,并推导了相应的滑坡推力表达式,但其中关于土拱效应的假定还有待进一步探讨。张玲等^[19]视基坑支护中的双排桩为竖直放置的弹性地基梁,将两排桩的排间土以水平向弹簧模拟,后排桩后侧土压力采用朗肯主动土压力,以弹性抗力法计算作用于前排桩基坑底面以下的被动抗力。其针对基坑支护问题的近似算法,未必适合条件更为复杂的滑坡治理中的双排抗滑桩情况。

肖世国等^[20]将抗滑桩受荷段前侧坡体视为水平向的Winkler地基,基于弹性地基梁模型,并考虑桩体受荷段与嵌固段的变形连续性,通过迭代算法确定出后排桩受荷段前侧坡体抗力,进而对排间坡体采用传递系数法计算出前排桩后侧滑坡推力。该方法建立在后排桩受荷段前侧坡体具有常抗力系数的基础上,有时与实际不一定相符。

胡峰^[21]通过室内模型试验,研究陡倾直线型滑面滑坡的双排抗滑桩后侧坡体压力分布模式,结果显示前、后排桩受荷段后侧滑坡推力呈梯形分布。徐骏等^[22]针对后陡前缓的折线形滑面滑坡,采用室内模型试验,得到两排抗滑桩分担滑坡推力大小与桩排间距的关系。然而,相关试验研究并没有详细给出两排桩后侧推力分布规律,更未涉及雨水入渗工况。

由上述相关研究现状可见,目前对基覆式滑坡双排桩后侧推力分布特征的认识尚不成熟,尤其是对考虑雨水入渗至基覆界面的情况鲜见报道。有鉴于此,文中针对双排桩加固基覆式滑坡,通过室内模型试验,采用坡体外注水,经过特定通道渗入滑带的方法来模拟强降雨条件对滑带的软化效应,以此确定在雨水入渗至滑带软化、后排桩沉埋等不同工况下后、前排桩后侧滑坡推力分布模式及大小。

1 试验模型设计

1.1 试验模型

综合现场调查、钻探、LiDAR数据,宝成铁路四川

段沿线的某处潜在堆积体滑坡主滑断面如图 1 所示, 滑坡体上发育缓坡平台, 滑坡总体长度约 150 m, 宽度约 120 m, 前宽后窄, 滑体为第四系全新统崩坡积块石土, 最大厚度约 19 m, 滑床为侏罗系上统中风化砂岩, 二者间存在一相对软弱的含砾黏土薄夹层(滑带)。遥感数据与区域地质资料综合分析得出坡体区域没有褶皱和断层, 也无构造应力作用。进一步根据现场地质勘察判断, 其属于推移式滑坡, 试验获得坡体主要参数见表 1。采用双排抗滑桩对该滑坡进行加固(图 1), 以其为试验原型, 模型几何相似比取为 $C_L=1:40$, 设置 4 组试验模型(图 2), 其中试验一、二、四设桩位置相同, 仅后排桩沉埋深度不同, 试验二、四的桩顶埋深分别占受荷段长度 1/3 和 1/2, 试验三桩顶沉埋比例同试验二, 但桩间距扩大为其 1.8 倍。

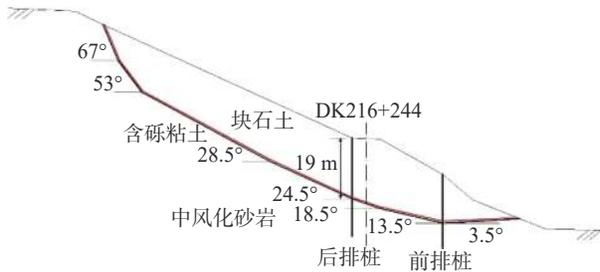


图 1 某滑坡实例横断面示意图
Fig. 1 Cross section of a landslide example

表 1 实例坡体主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of the practical landslide

| 地层 | 重度 $/(kN \cdot m^{-3})$ | 黏聚力 $/kPa$ | 内摩擦角 $/(^{\circ})$ | 弹性模量 $/MPa$ | 泊松比 |
|-------|----------------------------|---------------|-----------------------|----------------|------|
| 块石土 | 21 | 15 | 24 | 40 | 0.30 |
| 含砾黏土 | 19 | 5 | 20 | 30 | 0.33 |
| 中风化砂岩 | 22 | 800 | 28 | 1 000 | 0.22 |

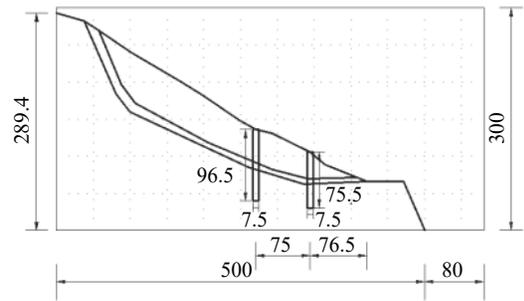
根据试验所依托试验室的场地条件, 制作大型模型试验槽, 其长为 5.8 m, 高为 3.0 m, 宽为 0.9 m。模型槽正前面镶嵌便于观察的透明钢化玻璃, 正后面为光滑水泥墙, 左侧封闭, 右侧敞口(图 3)。

1.2 试验材料

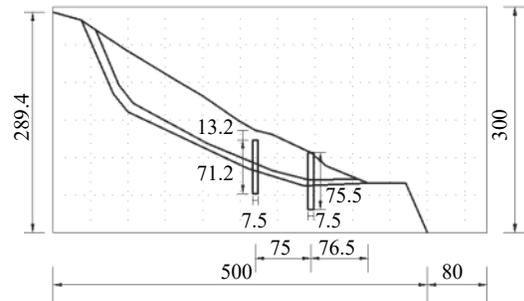
取重度相似比为 1, 根据相似定律得应力相似比为 1:40, 进而通过正交配试验配置相似材料。

(1) 坡体材料

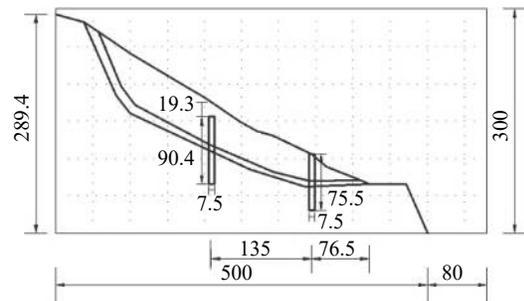
试验中, 以细沙为主并拌和滑石粉模拟滑带, 用中砂与重晶石粉混合模拟滑体, 用粗砂、重晶石粉及铁粉混合模拟滑床。各组试验滑带、滑体及滑床的内摩擦



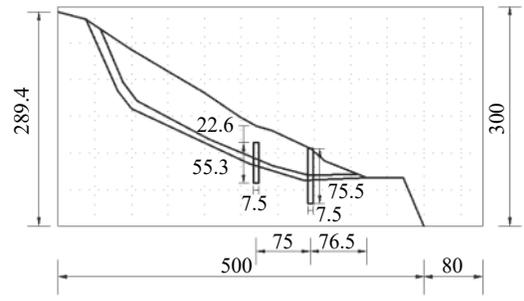
(a) 模型试验一



(b) 模型试验二



(c) 模型试验三



(d) 模型试验四

图 2 各试验模型横断面图(单位: cm)

Fig. 2 Cross-section of each testing model (unit: cm)

角(φ)、黏聚力(c)、重度(γ)和含水量(ω)如表 2 所示, 其中强度参数通过应变控制式直剪试验获得, 括号内值为滑带土浸水饱和时参数, 该值近似作为滑带软化后的强度参数。

(2) 桩体材料

试验目的主要是确定桩侧坡体压力, 因此试验中对抗滑桩(原型为 C30 混凝土)的模拟以其刚度条件满足



图 3 模型试验槽照片

Fig. 3 Photo of the model test container



图 4 抗滑桩模型

Fig. 4 Physical model of the anti-slide piles

表 2 各组试验滑带、滑体及滑床的物理力学参数

Table 2 Main physical and mechanical parameters of testing models

| | 组号 | $\varphi/(\circ)$ | c/kPa | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\omega/\%$ |
|----|----|-------------------|----------------|--|-------------|
| 滑带 | 一 | 20.6(19.7) | 0(0) | 19.3 | 6.21 |
| | 二 | 20.3(19.6) | 0(0) | 20.1 | 7.21 |
| | 三 | 20.8(20.0) | 0(0) | 19.4 | 7.68 |
| | 四 | 20.6(19.9) | 0(0) | 19.3 | 6.21 |
| 滑体 | 一 | 24.5 | 1.6 | 20.5 | 6.09 |
| | 二 | 24.5 | 1.6 | 20.5 | 6.09 |
| | 三 | 23 | 1 | 21.2 | 8.16 |
| | 四 | 24 | 1 | 20.8 | 7.80 |
| 滑床 | 一 | 27.7 | 19.5 | 21.6 | 5.12 |
| | 二 | 28.2 | 20.3 | 21.8 | 5.23 |
| | 三 | 28 | 18.6 | 21.5 | 5.02 |
| | 四 | 27.8 | 19.7 | 21.8 | 5.17 |

相似性作为主控因素。经过多组配比试验比选,以一定比例的石膏、水泥与水混合制成模型桩体,其弹性模量约为 0.8 GPa。

抗滑桩原型截面尺寸为 2.0 m×3.0 m,桩间距为 8 m,根据几何相似比换算,模型桩体为 5 cm×7.5 cm(图 4),桩间距 20 cm,双排桩等间距布置,每排 3 根。

1.3 滑带软化模拟

在进行模型试验时,除普通工况外,还需考虑强降雨条件对滑坡的影响,即雨水入渗对滑带的软化作用。为此,通过在坡体外注水,经过特定通道渗入滑带的方法来模拟滑带软化。此外,为便于较显著模拟坡体滑移及破坏特征,采用坡面均布堆载方式来促使坡体滑动。

1.4 试验荷载工况

在每组设桩模式下,试验均分为如下 3 种工况:

- (1) 试验填筑完成后状态,即天然工况;
- (2) 在工况(1)基础上向滑带注水,即强降雨工况;

(3) 在工况(2)基础上于滑体中后部坡面堆载 10 kPa,即超载工况。

1.5 桩侧坡体压力测试

对于各桩前后两侧坡体压力大小及其分布模式,采用高精度电阻应变式压力传感器(土压力盒)测量,利用黏结剂将其粘贴面固定(或者锚固)于桩体表面(图 5)。在模型槽外通过电阻应变仪接受信号并换算成压应力,采用自动数据采集的方法。四组试验前排桩土压力盒设置相同,后侧桩顶以下 8 cm 开始,依次间隔 8 cm 在受荷段布置 4 个土压力盒;对于后排桩,试验一、二、三、四的土压力盒间隔分别为 8 cm、8 cm、8 cm 和 5 cm,近桩顶土压力盒距桩顶深度分别为 10 cm、3 cm、8 cm 和 3 cm,受荷段土压力盒分别为 5 个、4 个、4 个和 3 个。



图 5 桩侧土压力传感器布置

Fig. 5 Layout of earth pressure sensors on the model piles

模型试验一、二、三、四的典型照片如图 6 所示。

1.6 操作步骤

- (1) 根据本试验模型具体特点,清扫整理试验槽。



(a) 模型试验一



(b) 模型试验二



(c) 模型试验三



(d) 模型试验四

图 6 各组模型试验典型照片

Fig. 6 Typical Photos of each model test

(2) 配置相似模型试验材料, 主要分为 3 类, 分别模拟滑体、滑带土、滑床, 通过室内常规试验测得 3 种相

似材料的主要物理力学参数。

(3) 在模型槽内前后两侧面上画出标记线, 包括地层分界线、设桩位置, 等。

(4) 分层填筑模型坡体, 为便于模拟滑面浸水, 在滑带中埋设细的塑料软管, 管体延伸到模型槽顶部, 以便向管中适当注水以模拟滑面浸水的状况; 同时, 根据桩长挖桩孔到相应位置, 将预先制作好并按设计已经布置好土压力盒的模型桩放入孔内, 填土压实, 并记录各土压力盒初始读数。

(5) 模型坡体的填筑及测试元件的埋置均完成后, 先静置一段时间, 然后以一定的时间间隔 (隔 1 h 记录一次) 读取桩侧土压力盒读数, 直至读数变化不明显且观测总时长达到 48 h, 视为测得足够数据, 本组试验结束, 其余工况以此类推。

(6) 再在模型槽顶部的塑料软管口向管内适当注水, 模拟滑面浸水状况, 然后仍以一定的时间间隔测量。桩侧土压力盒的读数, 直到测得足够数据。

(7) 根据实际试验情况, 考虑在滑坡体中后部进行坡面堆载, 然后仍以一定的时间间隔测量此时桩侧土压力盒的读数, 直到测得足够数据, 本组试验完成。

(8) 卸除土体、桩体结构及测试元件, 再重复 (3) — (7) 的步骤, 进行新的一组试验。

(9) 如此反复, 直到所有情况的各试验 (共 4 组) 均完成。

2 试验结果

整理分析中间桩 (沿滑坡宽度方向) 的测试数据, 可得各组试验中双排桩后侧推力分布如图 7—图 10 所示。可见, 不同后排桩布设方式下双排桩后侧坡体压力都基本呈两端小中间大的抛物线型分布, 且峰值点位于受荷段中点以下。桩位不变时, 对比图 7(a)、图 8(a)、图 10(a) 可见, 后桩后侧坡体压力峰值随着其沉埋深度增大而减小且峰值点位置上移; 对比图 7(b)、图 8(b)、图 10(b) 可得, 前桩后侧坡体压力峰值随后桩沉埋深度增大而增大且峰值点位置无明显变化。同时可见, 各试验注水前、后桩上推力分布模式保持不变, 但注水后双排桩上坡体压力增大, 且相比桩顶和底部, 桩身中间部分坡体压力增加幅度较大。由表 3 所列出的各试验注水前、后桩上推力值可见, 对于试验一、二、三、四, 注水软化后双排桩上推力明显大于注水前, 对于后排桩分别增大约 14.9%、14.3%、16.2%、21.4%; 对于前排桩分别增大约 17.9%、17.9%、24.8%、24.1%。综合两个工况

(天然、降雨)试验结果可知,后排桩沉埋比为 0.5 时,桩上推力(1.12 kN/m、1.36 kN/m)较全长时(2.76 kN/m、3.17 kN/m)分别减小 59.4%、57.1%,而前排桩上净推力(1.08 kN/m、1.34 kN/m)较全长时(0.78 kN/m、0.92 kN/m)分别增大 27.8%、31.3%。可见,后排桩上减小的推力值大于前排桩上增加的推力值,这是由于后排桩顶土体传递过来的部分推力可由排间土体强度提供的抗力予以承担,即排间土体的抗力作用得以发挥。因此,从受力角度而言,如果后排桩沉埋深度适当,沉埋与全长组合桩较双排全长桩更具经济合理性。

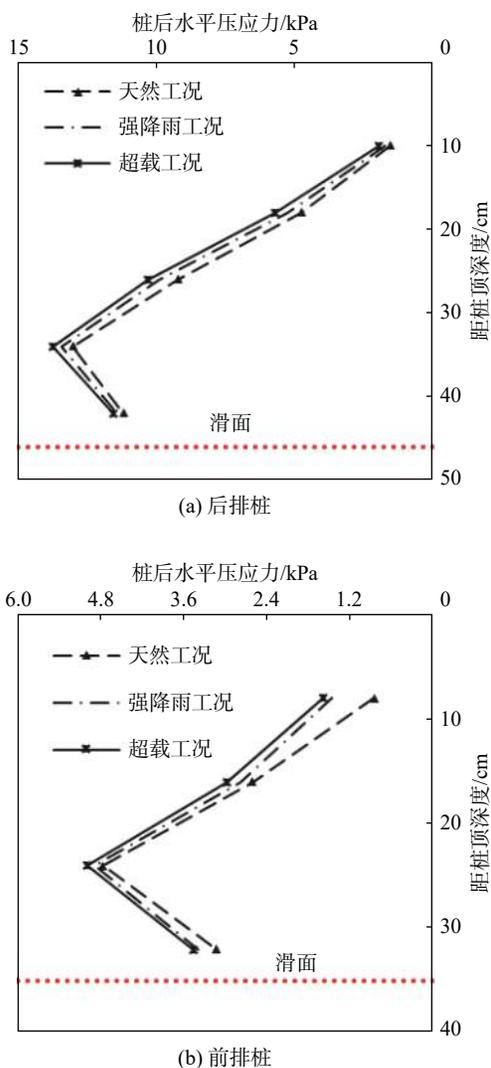


图 7 试验一双排桩受荷后侧坡体压力分布图

Fig. 7 Distribution curves of thrust on the double-row piles above the slip surface in model 1

3 讨论

为了进一步说明试验结果的合理性,利用 FLAC^{3D}

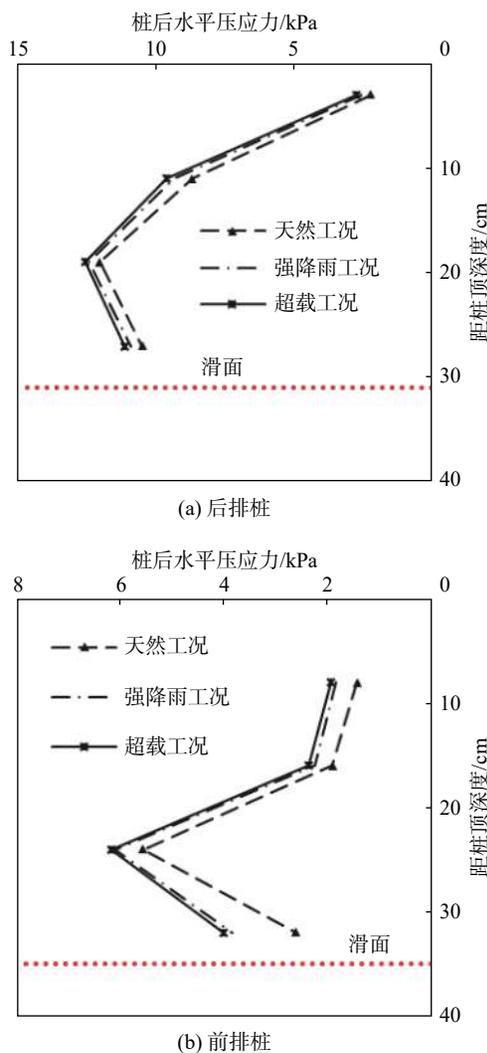


图 8 试验二双排桩受荷后侧坡体压力分布图

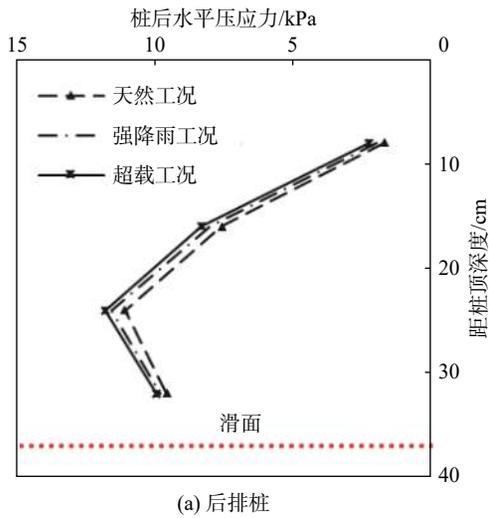
Fig. 8 Distribution curves of thrust on the double-row piles above the slip surface in model 2

表 3 各组试验注水前、后所得后排桩上推力比较

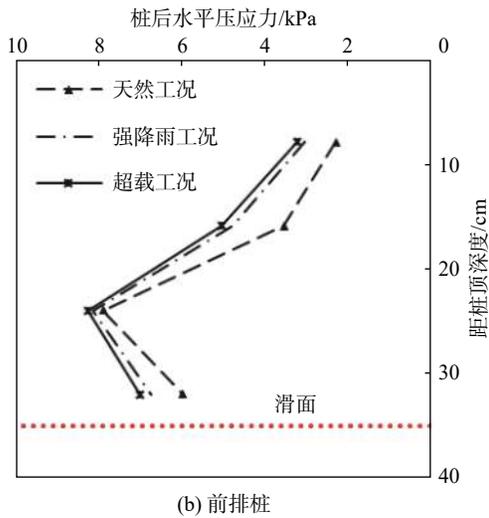
Table 3 Comparison of thrust on the rear piles before and after grouting water in four tests $/(kN \cdot m^{-1})$

| 试验组别 | 后排桩 | | 前排桩 | |
|------|------|------|------|------|
| | 注水前 | 注水后 | 注水前 | 注水后 |
| 试验一 | 2.76 | 3.17 | 0.78 | 0.92 |
| 试验二 | 2.23 | 2.55 | 0.84 | 0.99 |
| 试验三 | 2.04 | 2.37 | 1.25 | 1.56 |
| 试验四 | 1.12 | 1.36 | 1.08 | 1.34 |

对其进行数值模拟分析,以试验一天然工况为例,如图 11 所示,其数值模型含 8 198 个 8 节点 6 面体单元,坡体材料采用服从摩尔-库仑屈服准则和关联流动法则的理想弹塑性本构模型,桩体视为弹性材料,采用结构单元模拟。模型前后左右四个边界采用水平位移约束,



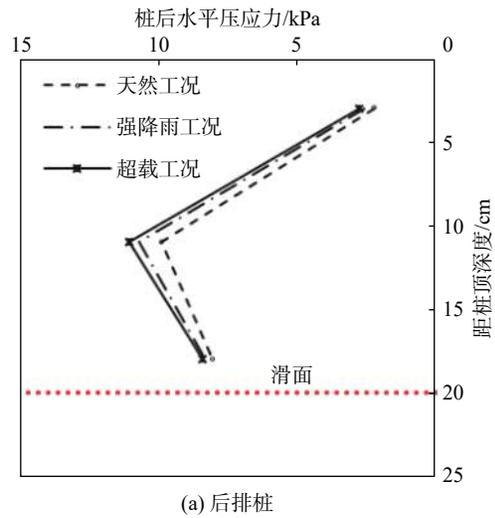
(a) 后排桩



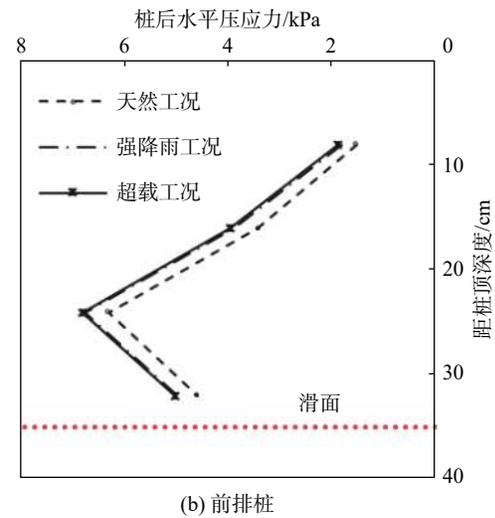
(b) 前排桩

图 9 试验三双排桩受荷段后侧坡体压力分布图

Fig. 9 Distribution curves of thrust on the double-row piles above the slip surface in model 3



(a) 后排桩



(b) 前排桩

图 10 试验四双排桩受荷段后侧坡体压力分布图

Fig. 10 Distribution curves of thrust on the double-row piles above the slip surface in model 4

底面采用水平和竖向位移约束。

图 12 为数值模拟得到的模型试验一的水平应力分布云图(受压为负), 由此可得双排桩后侧压应力分布如图 13 所示。可见, 两种方法确定的后、前排桩上坡体压力都呈抛物线形分布, 且峰值点位置非常接近, 都位于受荷段中点以下相对接近滑面位置。

双排桩上推力值的试验与数值模拟结果对比如表 4 所示。可见, FLAC^{3D} 算得的推力值较试验值偏大, 且二者的前排桩上推力值相差更大。对于后排桩, 注水前后的数值解较试验值分别偏大约 24.6%、20.5%; 对于前排桩, 注水前、后, 数值解较试验值分别偏大约 50.0%、39.1%。造成这种差异的原因可能为: 一方面, 尽管试验槽前后侧面做了光滑处理, 但仍不可避免存在一定的摩阻力, 由此减小了作用于桩上的滑坡推力; 另

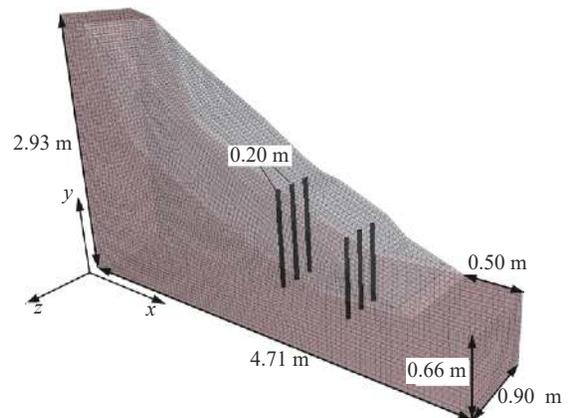


图 11 试验一对应的双排桩加固滑坡数值模型

Fig. 11 Numerical model of test model 1

一方面, 数值模拟方法没有考虑模型前后侧面的摩阻力, 易造成数值解偏大。

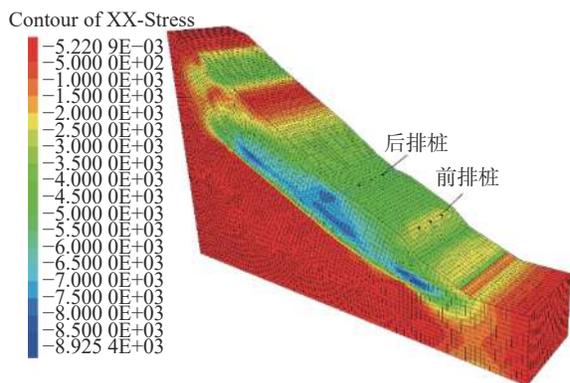
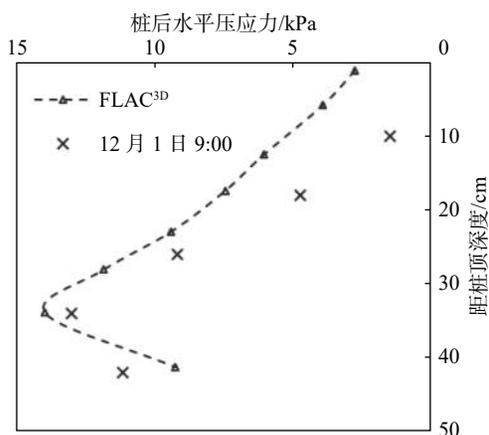
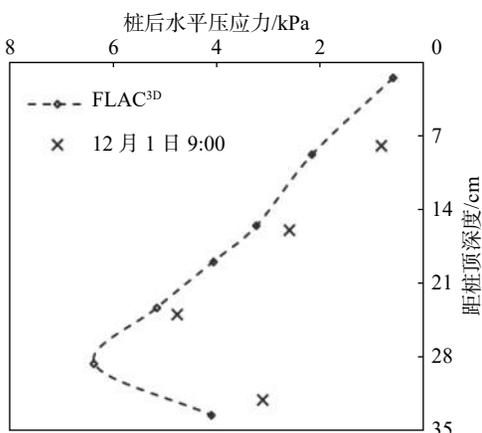


图 12 天然工况下试验一对应的水平应力分布云图

Fig. 12 The horizontal stress contour of test model 1 under natural working conditions



(a) 后排桩



(b) 前排桩

图 13 试验一不同方法获得的双排桩受荷段后侧坡体压力分布图

Fig. 13 Distribution curves of thrust on the piles of model 1 by different methods

4 结论

通过四组不同后排桩布设方式的双排桩加固大型滑坡物理模型试验,考虑一般状况和强降雨软化滑带状况,并结合 FLAC^{3D} 数值模拟方法,确定了双排抗滑桩

表 4 试验一双排桩后侧推力试验值与数值解对比

Table 4 Comparison of thrust on the fore and rear piles in test model 1 between the measured and numerical values

| 方法 | 后排桩 | | 前排桩 | |
|-----|------|------|------|------|
| | 注水前 | 注水后 | 注水前 | 注水后 |
| 试验值 | 2.76 | 3.17 | 0.78 | 0.92 |
| 数值解 | 3.44 | 3.82 | 1.17 | 1.28 |

后侧滑坡推力分布特征,主要得出以下结论:

(1)后、前排桩上坡体压力均呈两端小、中间大的抛物线形分布模式,其峰值点均位于受荷段中点以下相对靠近滑面位置。

(2)设桩位置不变时,后桩后侧坡体压力峰值随其沉埋深度增大而减小且峰值点位置上移;前桩后侧坡体压力峰值随后桩沉埋深度增大而增大,但峰值点位置无明显变化。

(3)滑带软化后并不改变双排桩上滑坡推力分布模式,但会增大前、后排桩后侧坡体压力,且相比桩顶和底部,桩身中间部分坡体压力增加幅度较大。

(4)滑带注水软化后双排桩上的推力均明显大于注水前,后排桩、前排桩分别增大约 14.3%~21.4% 和 17.9%~24.8%。

参考文献 (References) :

[1] 徐邦栋. 滑坡分析与防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. [XU Bangdong. Landslide analysis and prevention [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese)]

[2] 闫玉平, 肖世国. 考虑滑带强度参数分区取值的堆积层滑坡稳定性分析方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 44-49. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Stability analysis method for bedrock-talus landslides considering strength parameter partition of slip shear band [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 44-49. (in Chinese with English abstract)]

[3] 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2222-2231. [ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2222-2231. (in Chinese with English abstract)]

[4] WANG J J, LIANG Y, ZHANG H P, et al. A loess landslide induced by excavation and rainfall [J]. Landslides, 2014, 11: 141-152.

- [5] XIAO S G, ZENG J X, YAN Y P. A rational layout of double-row stabilizing piles for large-scale landslide control [J] . *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(1): 309 – 321.
- [6] XIAO S G. A simplified approach for stability analysis of slopes reinforced with one row of embedded stabilizing piles [J] . *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(4): 1371 – 1382.
- [7] 申永江, 杨明, 项正良, 等. 双排桩桩排间土拱效应的发育规律研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2015, 42(1): 70 – 74. [SHEN Yongjiang, YANG Ming, XIANG Zhengliang, et al. Development of soil arching between the double-row anti-sliding piles [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(1): 70 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [8] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide [J] . *Soils and Foundations*, 1982, 22(1): 1 – 13.
- [9] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 肖世国. 似土质边(滑)坡抗滑桩后滑坡推力分布模式的近似理论解析 [J] . *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 120 – 123. [XIAO Shiguo. Approximate theoretical solution of distribution modes of landslide thrust on anti-sliding piles in soil-like slopes or landslides [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 120 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles [J] . *Soils and Foundations*, 1975, 15(4): 43 – 59.
- [12] RANDOLPH M F. The response of flexible piles to lateral loading [J] . *Géotechnique*, 1981, 31(2): 247 – 259.
- [13] 国家铁路局. 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2019 [S] . 北京: 中国铁道出版社, 2019. [Code for design of retaining structures of railway earthworks: TB 10025—2019 [S] . Beijing: China Railway Publishing House, 2019. (in Chinese)]
- [14] 熊治文. 深埋式抗滑桩的受力分布规律 [J] . *中国铁道科学*, 2000, 21(1): 48 – 56. [XIONG Zhiwen. Force distribution rule of deeply buried anti slide pile [J] . *China Railway Science*, 2000, 21(1): 48 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 雷文杰. 沉埋桩加固滑坡体的有限元设计方法与大型物理模型试验研究 [D] . 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006. [LEI Wenjie. Study on design method of deeply buried piles stabilizing slides and large scaled model tests [D] . Wuhan: Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3552 – 3558. [ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Calculation of inner force of support structure for landslide/slope by using strength reduction fem [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3552 – 3558. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 宋雅坤, 郑颖人, 雷文杰. 沉埋式抗滑桩机制模型试验数值分析研究 [J] . *岩土力学*, 2007, 28(增刊1): 63 – 68. [SONG Yakun, ZHENG Yingren, LEI Wenjie. Analysis of the experimental mechanism of deeply buried anti-slide pile by FEM [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Sup 1): 63 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 申永江, 黄立, 严克伍. 悬臂双排桩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)]
- [19] 张玲, 朱幸仁, 欧强. 考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 72 – 80. [ZHANG Ling, ZHU Xingren, OU Qiang. Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 72 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 肖世国, 何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法 [J] . *岩土力学*, 2015, 36(2): 376 – 380. [XIAO Shiguo, HE Hong. An approximate analytical method for calculating thrust on double-row stabilizing piles [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 376 – 380. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 胡峰. 基覆式滑坡中双排全长式与沉埋式抗滑桩受力规律研究 [D] . 成都: 西南交通大学, 2010. [HU Feng. Research on the mechanical features of double-row anti-slide piles with tops exposed or embedded in bedrock-overburden landslide control [D] . Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 徐骏, 李安洪, 肖世国. 折线型滑面滑坡桩排推力分布规律研究 [J] . *岩土力学*, 2012, 33(11): 3479 – 3482. [XU Jun, LI Anhong, XIAO Shiguo. Study of landslide thrust distribution law of row of piles in reinforced landslide with polygonal line slip surface [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3479 – 3482. (in Chinese with English abstract)]