

## 无连梁双排抗滑桩与单排抗滑桩水平推桩模型试验对比

汤科, 郑达, 程儒淞

### Comparison of horizontal push-pile model tests between non-beam double-row anti-slide piles and single-row anti-slide piles

TANG Ke, ZHENG Da, and CHENG Rusong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

#### 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

#### 预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables  
周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

#### 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

#### 大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究

A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide  
向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 叶丹, 姜雷 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 125-131

#### 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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404004

汤科, 郑达, 程儒淞. 无连梁双排抗滑桩与单排抗滑桩水平推桩模型试验对比 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 91-101.  
TANG Ke, ZHENG Da, CHENG Rusong. Comparison of horizontal push-pile model tests between non-beam double-row anti-slide piles and single-row anti-slide piles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 91-101.

## 无连梁双排抗滑桩与单排抗滑桩水平推桩模型 试验对比

汤科, 郑达, 程儒淞

(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)

**摘要:** 在大型滑坡防治工程设计中, 采用何种形式的抗滑桩进行支护是一个关键问题。为了研究双排抗滑桩与单排抗滑桩加固边坡的效果, 通过大型物理模拟模型开展了无连梁双排桩与单排桩水平推桩的对比试验, 并深入分析了坡体破坏模式及桩体受力特性方面的差异。结果表明: (1) 坡体破坏时, 单排桩在桩间前后出现土拱效应, 而双排桩却因为绕流的原因形成了“八”字形裂缝且后排桩还出现了挠曲现象; (2) 无论是单排桩还是双排桩, 其桩顶位移曲线都展现了压密变形、弹性变形、加速变形和塑性破坏四个阶段特征, 在加速变形阶段, 后排桩桩顶位移大约是前排桩的 2 倍, 单排桩桩顶位移大约是同桩位前排桩的 1.5 倍, 受到“遮挡效应”的影响, 双排桩的抗滑效果比单排桩好 15% 左右; (3) 桩侧土压力均沿着桩身大致呈三角形—梯形的分布, 并且桩后土压力都大于桩前土压力; 在桩身弯矩方面, 二者均呈现出类似于抛物线的分布趋势, 并且在靠近滑面处(滑面之上 7 cm)弯矩最大; (4) 在水平推力相同的情况下, 后排桩的弯矩最大, 其次是单排桩, 前排桩弯矩最小。由于后排桩的存在使得前排桩的最大弯矩比单排桩降低了 27% 左右, 从而提高了抗滑桩的抗滑效果。研究结果可为滑坡防治工程的设计和治理提供指导。

**关键词:** 无连梁双排抗滑桩; 水平推桩; 受力特性; 破坏模式; 对比试验

中图分类号: U213.1+52.1; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0091-11

## Comparison of horizontal push-pile model tests between non-beam double-row anti-slide piles and single-row anti-slide piles

TANG Ke, ZHENG Da, CHENG Rusong

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** In large-scale landslide control engineering design, the selection of anti-slide pile support is a critical design consideration. To investigate the effectiveness of double-row anti-slide piles compared to single-row reinforcement for slopes, this study conducted comparative tests of unconnected double-row piles and single-row piles using a large-scale physical simulation model, and the differences in slope damage modes and pile force characteristics were analyzed in depth. The results indicate that during slope failure, single-row piles exhibit soil

收稿日期: 2024-04-01; 修订日期: 2024-08-05

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(42293353); 自然资源部丘陵山地质灾害防治重点实验室自主课题(KLGHZ202101); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2022Z002)

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](mailto:1450797228@qq.com)

通讯作者: 郑达(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害评价防治及高边坡稳定性教学与研究工作。E-mail: [da.zheng@cdu.edu.cn](mailto:da.zheng@cdu.edu.cn)

arching effects between the piles, while double-row piles form “eight”-shaped cracks due to flow around the piles, with the rear piles experiencing bending. Both single-row and double-row piles exhibit four stages of deformation characteristics in their pile head displacement curves: densification deformation, elastic deformation, accelerated deformation, and plastic failure. In the accelerated deformation stage, the pile head displacement of rear piles is approximately twice that of front piles for double-row piles, and for single-row piles, it is approximately 1.5 times that of the front piles. Due to the “shielding effect”, the anti-slide effect of double-row piles is approximately 15% higher than that of single-row piles. The lateral soil pressure along the pile body generally exhibits a triangular-trapezoidal distribution, with the soil pressure behind the pile greater than that in front of the pile. Regarding pile bending moments, both exhibit a distribution trend similar to a parabola, with the maximum moment occurring near the sliding surface (7 cm above it). Additionally, under the same horizontal thrust, the rear pile experiences the maximum bending moment, followed by the single-row pile, while the front pile experiences the minimum bending moment. The presence of rear piles reduces the maximum bending moment of front piles by approximately 27% compared to single-row piles, thus enhancing the anti-slide effect of the pile. These findings provide guidance for the design and treatment of landslide control engineering projects.

**Keywords:** non-beam double-row anti-slide piles; horizontal push-pile; force characteristics; failure mode; comparative experiment

在一般的滑坡防治工程设计中,单排抗滑桩被广泛应用,并取得了显著效果<sup>[1]</sup>。然而,在面对推力较大的大型或特大型滑坡时,单排抗滑桩往往无法提供足够的抗力,难以有效防止滑坡发生<sup>[2-3]</sup>。此外,在设计过程中还需增加截面尺寸或钢筋用量,从而增加了施工成本<sup>[4]</sup>。为此,双排抗滑桩作为一种经济合理的新型支挡结构被广泛使用<sup>[5-7]</sup>。根据结构类型的不同,双排抗滑桩可分为无连梁双排抗滑桩,如悬臂式双排桩<sup>[8]</sup>和沉埋式双排桩<sup>[9]</sup>,以及整体刚度较大的有连梁双排抗滑桩,如门架式双排桩<sup>[10]</sup>和H形双排桩<sup>[11]</sup>。其中,无连梁双排抗滑桩由于设计简单、施工便捷,常被视为首选的抗滑支挡结构之一<sup>[12-13]</sup>。

目前,在滑坡治理领域,双排抗滑桩得到了国内外学者的广泛关注和深入研究。在理论研究方面,申永江等<sup>[14]</sup>通过极限平衡理论和土拱理论推导出悬臂式双排桩桩后滑坡推力公式;肖世国<sup>[15]</sup>采用传递系数法分析抗滑桩的内力,推导出与分析模型相应的桩体受荷段底端内力计算公式,并给出了在滑坡推力线性分布条件下作用于受荷段的净滑坡推力计算表达式;薛德敏等<sup>[16]</sup>同样考虑了桩土变形协调,采用竖向土拱理论得到前后排桩间非极限主动土压力计算方法并推导了前后排桩桩后滑坡推力在非极限状态下的计算公式。在数值模拟方面,Xiao等<sup>[17]</sup>利用数值模拟的方法,研究了折线型滑面条件下后排桩的合理埋深和两排桩间距较小时更合理的布桩形式;曹岩<sup>[18]</sup>通过物理模型试验研究了双排桩的受力特性,

最后采用ABAQUS数值模拟软件验证了模型试验的合理性;闫玉平等<sup>[19]</sup>针对不同后排桩布设方式的双排桩室内物理模型试验,得到不同工况下双排桩后侧滑坡推力分布特征,并运用数值模拟软件FLAC3D验证其结果的准确性。在物理模拟方面,刘伟<sup>[20]</sup>开展了无连梁双排抗滑桩应用在黄土滑坡治理中的模型试验研究,得到了在一定外部荷载作用下双排抗滑桩的受力特性及破坏模式之间的关系并通过数值模拟软件对模型试验进行了对比验证;Ma等<sup>[21]</sup>通过双排抗滑桩与滑坡相互作用的物理模型试验,得到了当两排抗滑桩间距与桩长相同时,位于前排桩后的滑坡推力约为后排桩的0.5~1.0倍;李永辉等<sup>[22]</sup>采用物理模型试验装置,研究连梁的长度和高度对H型抗滑桩受力、变形的影响规律,探讨了H型抗滑桩受力特性和内在机制,并推导出桩后滑坡推力抛物线型分布表达式。

从当前国内外的研究现状可知,双排抗滑桩加固边坡的研究主要集中在计算方法的理论研究和数值模拟方面。然而在大型物理模拟试验方面的研究相对较少,尤其是双排桩与单排桩之间的对比试验基本属于空白,因此开展双排桩与单排桩加固边坡效果的对比试验显得十分必要。另外,在抗滑桩设计中主要考虑受到水平推力的作用。鉴于此,本文采用水平推桩模型试验对无连梁双排抗滑桩和单排抗滑桩分别进行了加固边坡的试验研究,通过对比分析探讨两组不同布桩方式的坡体破坏模式和桩体受力特性,以期

为大型滑坡防治工程的设计和治理提供参考。为了方便说明, 本文将先受到推力的抗滑桩称为后排桩, 后受到推力的抗滑桩称为前排桩。

## 1 试验方案设计

### 1.1 模型设计

本次水平推桩模型试验主要是双排抗滑桩与单排抗滑桩的对比试验, 因此设置两组模型试验, 分别为单排桩试验和双排桩试验(双排桩采用无连梁的双排桩), 两组试验的桩间距保持一致。为了方便设计桩孔, 其中单排桩的桩位与双排桩中前排桩桩位相同。模型试验方案如表 1 所示, 前排桩左右分别为 #1、#3 桩, 后排桩左右分别为 #2、#4 桩。

表 1 模型试验方案  
Table 1 Model test scheme

编号	描述	桩间距/mm	桩排距/mm
模型1	单排桩试验	480	—
模型2	双排桩试验	480	360

室内模型试验按照相似理论进行设计, 模型箱选择地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的 MTS 液压伺服加载模型箱。本次模型边坡参考了顺邵高速公路某二元结构边坡<sup>[23]</sup>, 上覆土体为黏质砂土, 下伏岩体为全风化云母石英岩。根据模型箱尺寸选择容重相似比  $C_\gamma=1$ , 几何相似比  $C_L=1:30$  进行边坡模型尺寸确定。以双排桩为例, 试验模型尺寸如图 1 所示。在边坡中部设置抗滑桩并嵌入到基岩中, 在边坡后侧安装一个推力板以传递并均匀分散后侧的水平推力到滑体上。

试验时在桩顶安装固定板, 方便用激光测距仪测量桩顶位移。另外在单排桩和前排桩桩身前后两侧分别各布置 4 个土压力盒, 用于测量每一级加载梯度下的桩侧土压力。为了获取桩身弯矩, 在桩身纵筋上预留好应变片, 每根桩布置有 4 根纵筋, 其中对角的 2 根布置有应变片, 每根纵筋 7 个应变片, 单根桩共 14 个应变片, 这些应变片可以反映出模型桩在受力时纵筋的应变情况, 根据材料力学相关公式可由前后两侧应变差值得到桩身的弯矩值。模型桩的土压力盒和应变片布置剖面图如图 2 所示。

### 1.2 材料设计

二元结构边坡的物质组成结构大部分为上覆堆积体和下伏基岩, 此次模型试验参考的边坡同样也是这种组成结构。考虑到 MTS 液压伺服加载模型箱底

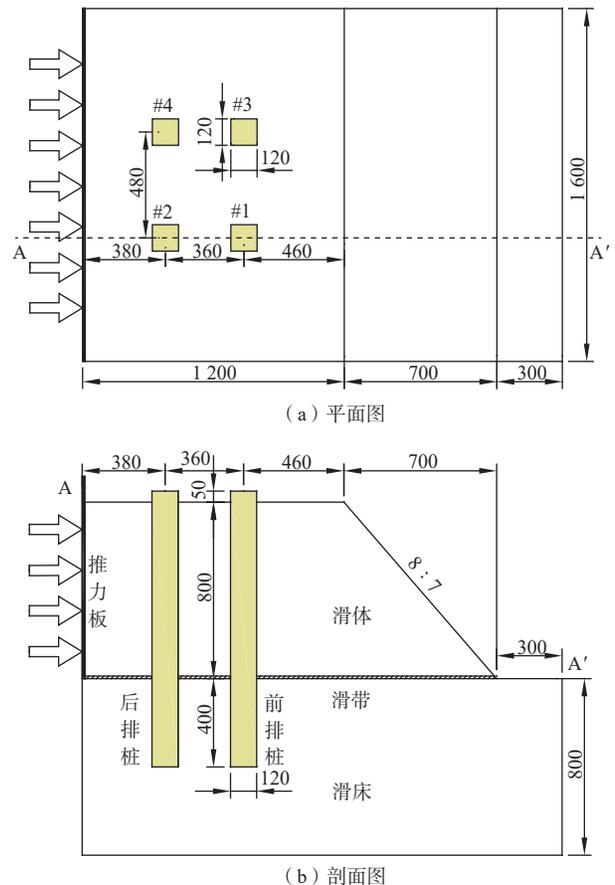


图 1 双排抗滑桩模型试验图 (单位: mm)

Fig. 1 Double-row anti-sliding pile model test (unit: mm)

部已有浇筑成型的石英砂岩, 正好与参考的模型下伏岩体相近, 因此可将该石英砂岩基座作为此次试验的滑床, 并参考了郑达等<sup>[24]</sup>关于低周往复荷载试验的基座模型。而上覆堆积体则选取黏质砂土作为滑体, 针对该黏质砂土选取 4 组共 16 个土试样进行应变控制式直剪试验(图 3)测定其物理力学参数, 黏聚力为 37 kPa, 内摩擦角为  $37^\circ$ , 与参考边坡工程土体物理力学参数相近, 可作为滑体相似材料。另外, 为了降低模型箱边界对模型边坡变形时的约束作用, 在模型箱的两侧边界部位的内壁涂抹了一层润滑剂, 在基覆界面处采用双层聚乙烯塑料薄膜来模拟滑带, 并在中间涂抹润滑剂。

按照相似比条件, 本次试验的模型桩采用钢筋混凝土材料, 模型桩截面尺寸为  $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$  的方形桩, 桩长为 1 250 mm, 纵筋用 4 根  $\phi 6$  的钢筋, 箍筋用  $\phi 4$  的钢丝且间距为 110 mm。《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T 0219—2006)<sup>[25]</sup>中规定抗滑桩嵌固段长应满足为总桩长的  $1/3 \sim 2/5$ , 因此将模型桩嵌固端长度定为 400 mm, 另外桩顶超出坡顶 50 mm, 便

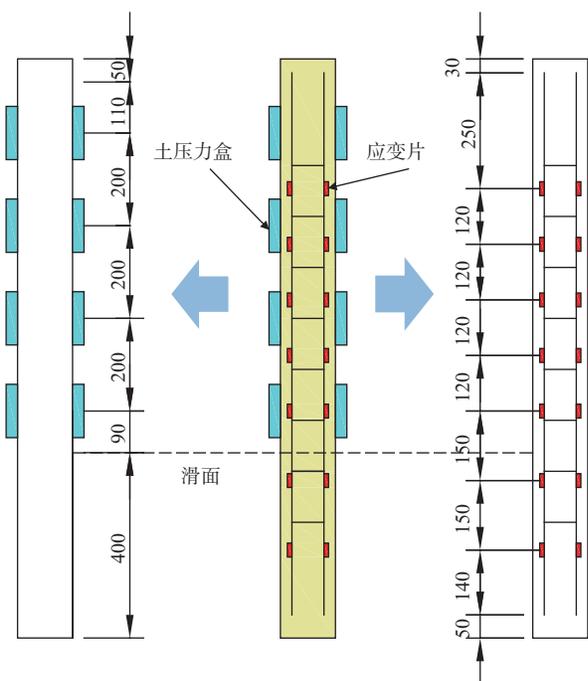


图 2 土压力盒及应变片布置图 (单位: mm)

Fig. 2 Earth pressure box and strain film arrangement (unit: mm)



(a) 四联直剪仪 (b) 滑体土试样

图 3 直剪试验

Fig. 3 Direct cutting test

于观察桩顶的位移现象和量测桩顶位移大小, 则滑面到坡顶的距离为 800 mm。按相似理论得出的模型试验材料及物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the model materials

名称	材料	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	泊松比
滑体	黏质砂土	20.5	37	37	0.31
滑床	石英砂岩	26.0	220	45	0.20
抗滑桩	钢筋混凝土	24.0	按弹性材料处理		0.20

### 1.3 加载方式设计

采用 MTS 液压伺服系统进行加载, 如图 4 所示。具体实现步骤是在作动器与滑体之间放置一块推力

板, 使用作动器分级施加水平荷载作用在推力板上并传递给滑体来模拟滑坡推力, 每级荷载增量为 10 kN, 加载速率为 1 kN/s。当每级荷载加载完毕后, 待各项数据基本稳定后进行坡面观察记录和数据采集, 然后继续进行下一级加载, 直至桩体破坏或边坡位移过大失稳破坏为止。



图 4 试验模型及加载装置

Fig. 4 Test models and loading devices

主要设备为: (1)模型箱, 长 4.0 m, 宽 2.5 m, 高 2.0 m, 后侧箱壁可以移动, 反力墙尺寸为 8.6 m×8.0 m, 设计总剪力和弯矩分别为 4 000 kN 和 30 000 kN·m; (2)MTS 多通道微机控制电液伺服加载装置, 作动器行程为 750 mm, 加载力范围为 1~500 kN, 可以分级给推力板加载水平作用力, 同时记录推力和位移随时间的变化情况; 推力板用于传递并分散作动器的推力均匀施加给可移动的模型箱后壁。

## 2 试验过程现象对比分析

### 2.1 坡体破坏分析

#### (1)单排桩试验

当荷载在 0~40.00 kN 时, 坡顶及坡表并未出现明显裂缝; 随着水平推力的继续增大, 开始在坡顶产生少许错动裂缝, 并且裂缝长度和高度逐渐增大; 当水平推力增加到 50.00 kN 时, 裂缝贯通整个后缘坡面, 并且出现上下错动现象, 左侧错坎约 9 mm, 右侧错坎约 5.6 mm, 桩间靠前裂缝宽 1 mm, 靠后裂缝宽 3 mm, 此时坡体尚未完全失稳; 当水平推力加载至 57.43 kN 时, 桩后贯通裂缝数量和宽度均有所增加, 左右两侧的裂缝上下错坎也增加了近 3 mm。此外, 在桩间前后的土体分别形成了不同形状和大小的拱形裂缝, 桩后土拱——应力拱, 其缝宽 2~11 mm; 桩前土拱——

位移拱, 其缝宽 5 ~ 17 mm。并且右侧#6 桩桩前土体与桩体发生分离, 其分离宽度约为 21 mm。同时坡表

土体脱落, 坡体形变剧烈, 最终因坡体失稳而破坏, 坡体破坏过程如图 5 所示。

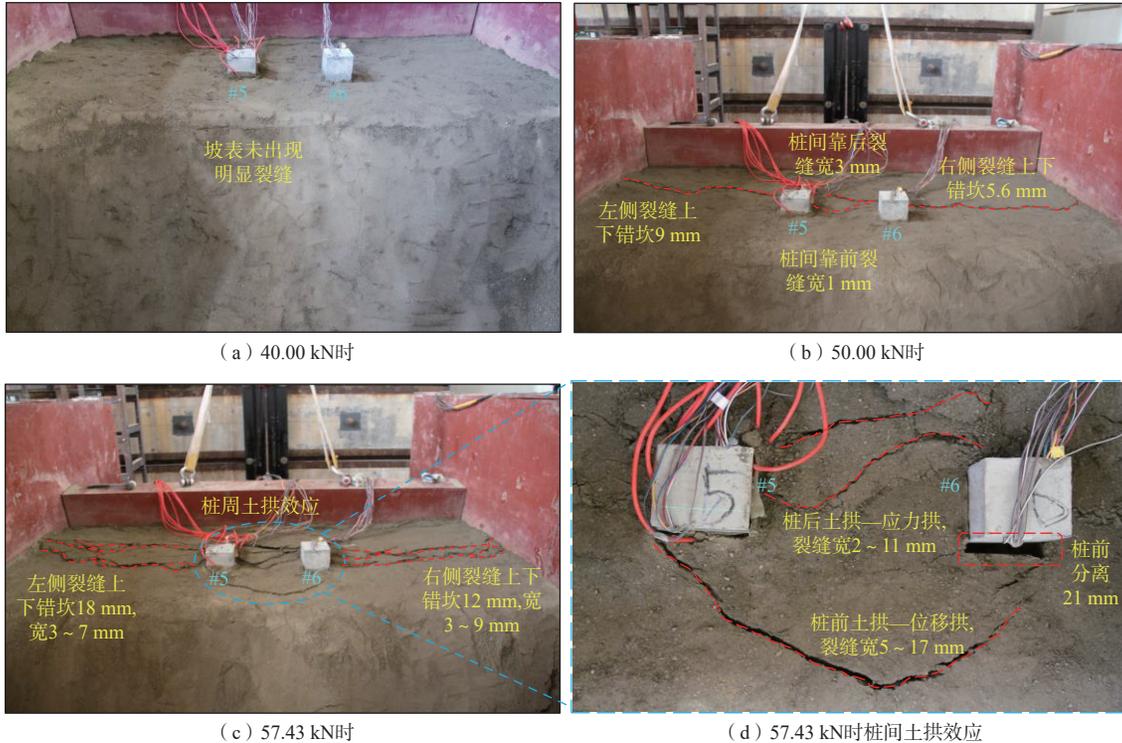


图 5 单排桩模型坡体破坏过程现象图

Fig. 5 Single-row pile model slope destruction process phenomenon

## (2) 双排桩试验

当荷载在 0 ~ 40 kN 时, 坡顶及坡表并未出现明显裂缝和错动; 随着水平推力增加到 50 kN 时, 在坡顶的后缘与中部均出现了少量小裂缝, 左侧有 2 条, 右侧有 3 条; 当水平推力加载至 60 kN 时, 坡顶后缘与中部原有的裂缝逐渐扩展, 并新增了多条长宽不等的裂缝; 当水平推力加载至 66 kN 时, 坡体发生破坏, 其主要破坏区域位于坡体后缘与坡表两侧中部, 大致沿试验台中心线呈左右对称分布, 坡体破坏过程如图 6 所示。桩周土体破坏集中于后排桩两侧, 土体被挤压隆起, 且土体较为破碎, 后缘坡面左侧裂缝上下错坎约 32 mm、缝宽 3 ~ 4 mm, 右侧裂缝上下错坎约 43 mm、缝宽 4 ~ 8 mm。而前排桩桩周土体破坏没有后排桩严重, 但前排桩桩前却形成“八”字形裂缝并逐渐向下延伸直至坡表中部, 如图 6(d) 所示, 其中左侧裂缝宽 1.5 ~ 2.3 mm, 右侧裂缝宽 1.2 ~ 1.4 mm。另外, 水平推力达到 66 kN 时, 应变监测数据显示桩身钢筋已经屈服, 且坡体变形也剧烈, 最终因桩体破坏而失稳。

无论是单排桩还是双排桩, 随着水平推力的增加

两组试验的坡体均出现了不同程度的破坏现象, 在后缘坡面都产生了贯通型错动裂缝。单排桩在桩间前后形成了拱形裂缝, 而双排桩在前排桩前却形成了“八”字形裂缝。其拱形裂缝即是桩周土体颗粒在受到荷载扰动后产生互相“楔紧”作用, 应力重分布现象——土拱效应<sup>[26-28]</sup>。随着水平荷载的增加, 桩后土与桩间土之间产生相对位移, 使桩后土体中主应力方向发生偏转, 最大主应力方向的连线呈半椭圆形拱形, 在桩后土体中形成了一个明显的应力拱, 把作用在拱后的土压力转为轴力再传至拱脚两桩体之上。同时由于桩内侧与土体之间的摩擦, 对土体产生一定的“拖曳”作用, 也导致桩前土体的主应力发生了改变, 使得桩前土体中出现与应力拱反方向的位移拱<sup>[29-30]</sup>, 如图 5(d) 所示。双排桩的裂缝形状与单排桩不同是因为双排桩模型在破坏时其后排桩的推力和位移均大于单排桩模型, 但前排桩却小于单排桩, 于是较大的推力作用在抗滑桩及滑体土上, 使得滑体土不得不绕开抗滑桩向前方移动, 即绕流, 于是便形成了“八”字形裂缝。

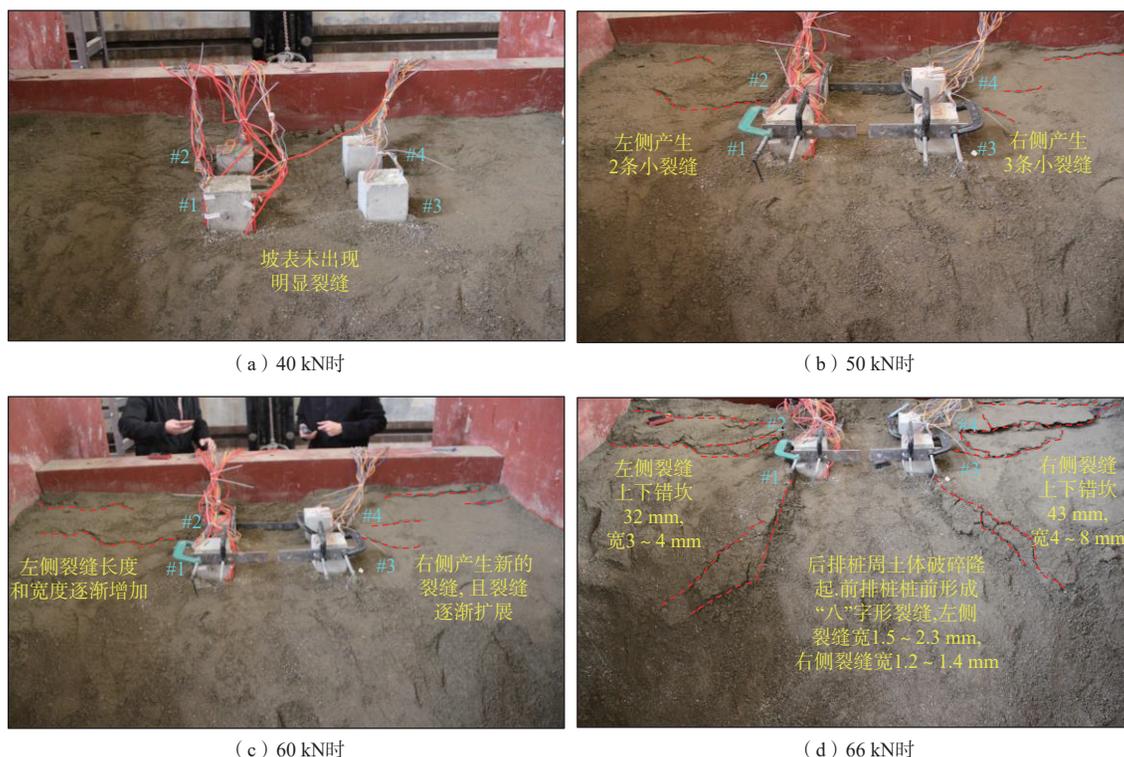


图 6 双排桩模型坡体破坏过程现象图

Fig. 6 Double-row pile model slope destruction process phenomenon

### 2.2 桩体破坏分析

从加载至结束的全过程中,单排桩试验因其坡体产生剧烈变形而结束试验,取出桩体发现桩身并无裂缝产生,且加载过程中始终处于弹性变形阶段。而双排桩试验中的前排桩整个桩身也并无裂缝产生,即加载过程中同样也处于弹性变形阶段。但是双排桩试验中的后排桩在桩身中部却出现数条垂直于桩长方向的裂缝(图 7a),并且在试验过程中通过应变监测数据也发现了桩身钢筋屈服。其中后排#2 桩和#4 桩的桩后都产生了 4 条近水平向贯通型裂缝,并且越靠近滑面,裂缝越集中,宽度也明显增加。其中最宽的裂缝位于#2 桩,距离桩底 45 cm 左右,即滑面(距桩底 40 cm)附近(图 7b),经过测量,所有桩侧裂缝长度约为桩截面宽度的 3/4。另外,后排桩桩身发生了挠曲破坏,与前排桩相比,挠曲主要发生在桩身的中下部,即滑面附近,并且挠曲破坏使得桩身整体弯曲偏移了 22 mm(图 7c)。

两组试验中单排桩和前排桩在整个加载至结束的过程中桩身均未出现裂缝,但双排桩的后排桩在桩身中部后侧产生了多条近水平裂缝,最宽的裂缝位于滑面附近,而且桩身还发生了挠曲破坏现象。究其根本原因是抗滑桩在受到推力时滑面附近受力最大,可

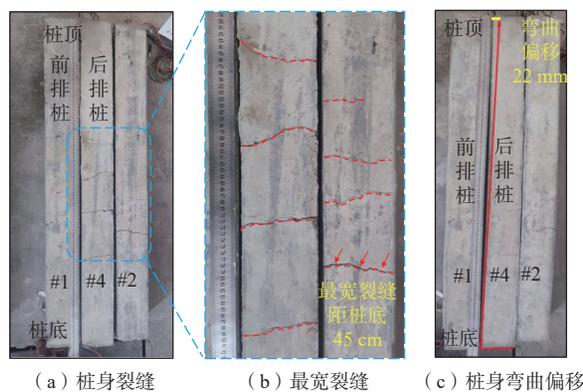


图 7 桩体破坏现象图

Fig. 7 Pile body destruction phenomenon

见在抗滑桩设计时可在滑面附近增加钢筋用量,从而增大抗滑桩的刚度、减小桩身挠曲。

## 3 试验结果对比分析

### 3.1 桩顶位移分析

试验过程中,用激光测距仪测量桩顶位移。单排桩和双排桩的桩顶位移都随着水平推力的增大而增加,图 8 是不同水平荷载下单排桩和双排桩的桩顶位移曲线图。

通过荷载-位移曲线变化规律可以得到:

(1)单排桩和双排桩的桩顶位移按曲线斜率的变

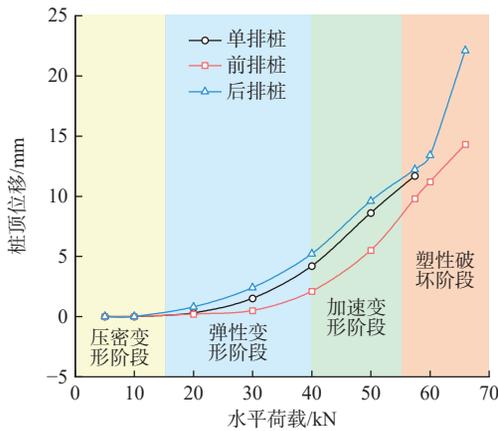


图 8 桩顶位移曲线图

Fig. 8 Pile top displacement curve

化可划分为四个阶段: ①第一阶段是荷载在 0~15 kPa 时, 滑体土处于压密变形阶段。此时的水平推力较小, 荷载主要用于压实滑体土, 桩顶位移几乎为 0; ②第二阶段是荷载在 15~40 kPa 时, 抗滑桩为弹性变形阶段。当土体被压实后, 水平推力作用在抗滑桩上, 随着抗滑桩受到持续的荷载, 桩顶位移在慢慢的增加, 后排桩桩顶位移速率为 0.192 mm/s; ③第三阶段是荷载在 40~55 kPa 时, 抗滑桩为加速变形阶段。此时水平推力还在不断增加, 坡体也产生了大量裂缝, 桩顶的位移变化明显加快, 后排桩桩顶位移速率为 0.44 mm/s; ④第四阶段是荷载在 55 kPa 至桩体或坡体破坏时, 抗滑桩为塑性破坏阶段。随着荷载的持续增加, 单排桩试验荷载加到 57.43 kPa 时, 其坡顶位移产生突变, 桩顶的位移为 11.7 mm, 坡体沿着滑面向前滑动, 模型边坡发生破坏; 而前排桩桩顶位移仅增加到 14.3 mm, 但后排桩的桩顶位移却急剧增大到 22.1 mm, 其位移速率也陡增至 1.45 mm/s, 此时后排桩因桩顶位移过大而破坏。同时可以发现, 桩顶位移曲线变化与斜坡典型变形演化模式(时间-变形曲线图)较为相似, 都表现出由缓慢变形、匀速变形、加速变形再到破坏的四个阶段<sup>[31-32]</sup>, 并且前者为桩顶位移、后者为桩周土体位移, 两者在四个阶段一一对应, 共同变化。

(2)对双排桩而言, 后排桩桩顶位移大于前排桩, 且随着水平荷载的增加, 前后排桩的桩顶位移差距逐渐增大。值得注意的是在加速变形阶段, 后排桩桩顶位移大约是前排桩的 2 倍, 单排桩桩顶位移大约是同桩位前排桩的 1.5 倍。主要原因是由于后排桩的桩位靠后, 滑坡推力先作用在后排桩上, 后排桩承担了大部分的推力。相比之下前排桩受到“遮挡效应”的影响, 当推力传至前排桩时已经消散很多, 所以前排桩

桩顶位移较后排桩小, 甚至比同桩位的单排桩还要小得多。

(3)当水平推力相同时, 双排桩中后排桩桩顶位移略大于单排桩桩顶位移, 同时, 单排桩桩顶位移也大于同桩位的前排桩桩顶位移。说明由于后排桩的存在, 前排桩桩顶位移明显小于相同荷载作用下的单排桩, 可见双排桩加固边坡效果比单排桩好。另外, 双排桩模型破坏时受到的水平推力比单排桩模型破坏时多 10 kN 左右, 即双排桩的抗滑效果比单排桩好 15% 左右。

### 3.2 桩侧土压力分析

试验时在桩身自由段前后沿桩身上下分别布置 4 个土压力盒, 用于测量桩身自由段在受到水平滑坡推力时的桩侧土压力。图 9 分别是单排桩和双排桩的前排桩自由段桩侧土压力在不同水平推力下的变化图。以抗滑桩(图中实线)和滑面(图中虚线)交点所在位置为坐标原点, 水平向右(沿推力方向)土压力值为正, 表示桩前所受土压力, 反之, 土压力值为负, 表示桩后土压力。

由图 9(a)可知, 单排桩自由段桩侧土压力沿桩身均大致呈三角形—梯形的分布形式, 最大土压力值在靠近滑面处。随着水平推力的增加, 桩后土压力逐渐增加, 但桩前土压力几乎不变。当达到模型破坏的推力时, 桩后最大土压力为 230 kPa, 桩前最大土压力为 130 kPa。由图 9(b)可知, 无连梁双排抗滑桩的前排桩自由段桩侧土压力沿桩身分布与单排桩相似, 也大致呈三角形—梯形的分布形式, 最大土压力值也在靠近滑面处。随着水平推力的增加, 桩后土压力逐渐增加, 最大土压力为 140 kPa, 桩前土压力几乎不变, 最大土压力为 120 kPa。值得一提的是当水平推力为 10 kN 时, 由于推力先作用于后排桩, 故前排桩桩侧土体还未压密, 桩侧土压力接近于 0。

将双排桩与单排桩的桩侧土压力对比分析, 可以发现: (1)随着水平推力的增加, 桩前土压力几乎不变且单排桩与前排桩桩前土压力几乎一致, 是因为桩前土体作为抗力体, 其体量和坡型均未变化, 抗力不变, 故桩前土压力也不变。但单排桩的桩后土压力大于同桩位前排桩的桩后土压力, 并且单排桩桩后土压力增加的幅度也大于前排桩, 越靠近滑面增加得越快。究其根本原因是由于水平推力大部分作用在后排桩上, 传递到桩排间土体上的力已经只有一小部分, 所以导致前排桩桩后土压力变小; (2)无论是前排桩还是单排桩, 桩侧土压力沿桩身均大致呈三角形—

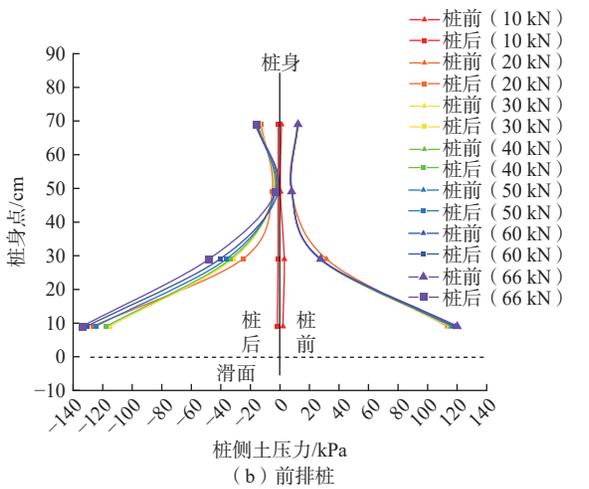
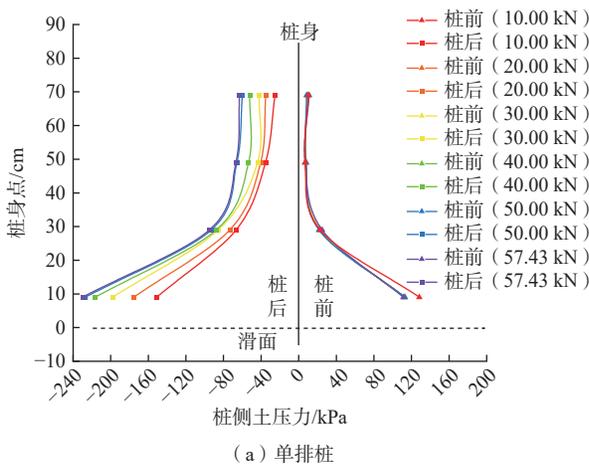


图 9 桩侧土压力分布图

Fig. 9 Power-side soil pressure distribution

梯形的分布,且桩后土压力都大于桩前土压力。这说明抗滑桩在抗滑过程中,大部分滑坡推力作用在桩上再由桩传递到了下伏基岩中,剩余的推力则递给了桩前土体,从而起到抗滑的作用。

### 3.3 桩身弯矩分析

当抗滑桩受到作用力时,桩内纵筋上布置的应变

片就会产生变化,通过应变采集仪采集并记录每一级加载梯度下的应变值,将前后纵筋上的应变值求差,运用材料力学相关公式即可求得该处桩身的弯矩值。图 10 是两次试验不同桩桩身弯矩分布图。

由图 10(a)可知,单排抗滑桩所受弯矩沿桩身均大致呈不规则的抛物线形式分布,随着水平推力的增加,桩身弯矩逐渐增大,最大弯矩在靠近滑面处,模型坡破坏时的最大弯矩为 670 N·m;由图 10(b)可知,前排桩所受弯矩沿桩身均大致呈抛物线的形式分布,随着水平推力的增加,桩身弯矩同样逐渐增大,最大弯矩同样在靠近滑面处,模型破坏时的最大弯矩为 710 N·m;由图 10(c)可知,后排桩所受弯矩沿桩身均大致呈不规则的抛物线的分布形式,但在滑面之上 23 cm 处桩身弯矩突然变小。随着水平推力的增加,桩身弯矩也逐渐增大,最大弯矩也在靠近滑面处,模型破坏时的最大弯矩为 2 420 N·m,是前排桩最大弯矩的 3 倍多。

将双排桩与单排桩的桩身弯矩对比分析来看可以发现:(1)单排桩和双排桩的弯矩均大致呈抛物线形分布,且都在靠近滑面处(滑面之上 7 cm)弯矩最大,此时滑面处的桩侧土压力也是最大,因此在设计抗滑桩时可以在滑面处相应的增加布筋,以便达到安全经济合理的最大化。同时也可以发现单排桩和后排桩弯矩在受荷段中间有一个突然变小的部位;(2)当水平推力都达到 50 kN 时,单排桩的最大弯矩为 480 N·m,前排桩的最大弯矩为 350 N·m,后排桩的最大弯矩为 750 N·m,可见因后排桩的存在使得前排桩的最大弯矩比同桩位的单排桩降低了 27%;(3)无论是双排桩还是单排桩,随着水平推力的增大,桩身弯矩均逐渐增加且后排桩的弯矩增加幅度最大。另外在水平推力相同的情况下,后排桩的弯矩值最大,

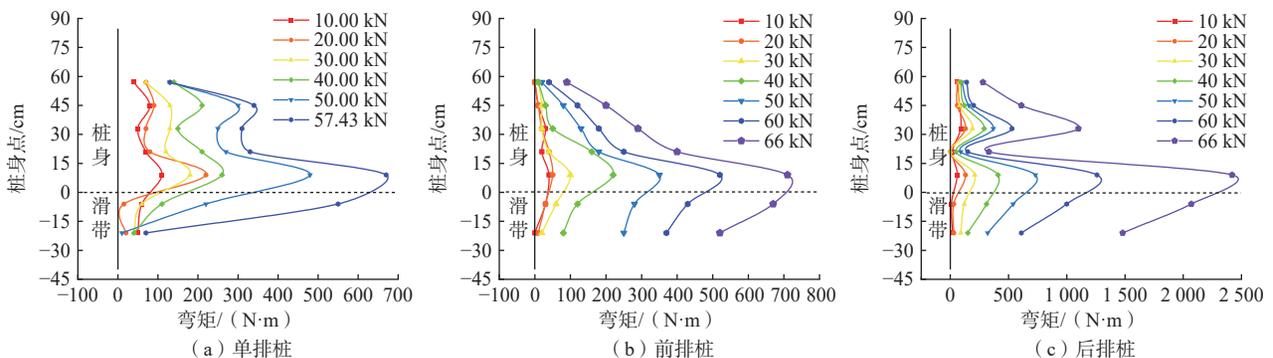


图 10 桩身弯矩分布图

Fig. 10 Daping of the bending moment of the pile body

其次为单排桩,前排桩弯矩最小。究其原因是由于后排桩的存在,大部分的滑坡推力都作用在后排桩上,可以有效地减少前排桩受到的滑坡推力,使得前排桩受到的弯矩比同桩位的单排桩小得多,可见双排桩的抗滑效果比单排桩好。

#### 4 结论

(1)随着水平推力的增加,无论是单排桩还是双排桩在坡体后缘都产生了贯通型错动裂缝。其中单排桩在桩间前后土体区出现“土拱效应”,而双排桩因为绕流的原因在桩前形成了“八”字形裂缝。另外,后排抗滑桩还发生了挠曲破坏现象,桩身整体偏移了 22 mm,且在靠近滑面处产生多条裂缝。

(2)桩顶位移曲线表明桩身经历了压密变形、弹性变形、加速变形和塑性破坏四个阶段。在加速变形阶段,后排桩桩顶位移大约是前排桩的 2 倍,单排桩桩顶位移大约是同桩位前排桩的 1.5 倍。由于受到“遮挡效应”的影响,前排桩桩顶位移最小。此外,从两组试验破坏时的水平推力可知双排桩的抗滑效果比单排桩好 15% 左右。

(3)桩侧土压力沿桩身均大致呈三角形—梯形的分布,桩后土压力都大于桩前土压力。随着水平推力的增加,两类桩的桩前土压力几乎不变,但单排桩的桩后土压力却大于前排桩。由于大部分推力作用在后排桩上,导致前排桩桩后侧土压力变小。

(4)桩身弯矩均大致呈抛物线形分布,在靠近滑面处(滑面之上 7 cm)弯矩最大,并且此处的土压力也是最大,因此在设计抗滑桩时可以在滑面处增加布筋。随着水平推力的增加,桩身弯矩逐渐增大,但前排桩弯矩却比同桩位的单排桩小,因后排桩的存在使得前排桩的最大弯矩比单排桩降低了 27% 左右,从而提高了双排桩的抗滑效果。

本文初步探讨了单排、双排不同布桩形式的抗滑桩加固边坡的效果,但由于仅进行了一次试验,存在一定的不足,如结果具有随机性或存在误差;若进行多次试验或采用数值模拟对物理试验进行验证,可以提高研究成果的准确性和科学性。同时本次模型试验的滑面为水平滑面,但实际滑坡的滑面大都为曲面,另外还需要考虑桩排距、桩间距等因素以及桩桩相互作用、桩土相互作用的影响。在真实斜坡抗滑结构设计中,还需要考虑抗滑桩的埋深、布置位置以及桩间土的挤出等问题。以上即是本研究的不足之处,还有待进一步深入研究。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 黎俊杰,肖世国.穿坡油气管道的框架桩防护结构分析方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1615-1628. [ LI Junjie, XIAO Shiguo. Analysis method of frame-type stabilizing piles for protecting petroleum pipelines through hillslopes[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1615 - 1628. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 宫凤梧,刘晨,郭文娟,等.双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析[J].水文地质工程地质,2022,49(1):109-116. [ GONG Fengwu, LIU Chen, GUO Wenjuan, et al. Improved calculation of the rigidity of double-row piles and double-beam composite support and displacement analysis under different soil properties[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 109 - 116. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 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. [ 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 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) ]
- [ 5 ] 周孝鑫,谭钦文,林志果,等.京广铁路K1219路基土质边坡深层滑移失稳机制与整治对策[J].地质科技通报,2022,41(6):85-94. [ ZHOU Xiaoxin, TAN Qinwen, LIN Zhiguo, et al. Deep sliding instability mechanism and remediation measures: The subgrade soil slope along the Jingguang Railway at K1219[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 85 - 94. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] WANG Chengtang, WANG Hao, QIN Weimin, et al. Behaviour of pile-anchor reinforced landslides under varying water level, rainfall, and thrust load: Insight from physical modelling[J]. *Engineering Geology*, 2023, 325: 107293.
- [ 7 ] 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) ]
- [ 8 ] 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) ]
- [ 9 ] 敖贵勇, 张玉芳, 赵尚毅, 等. 埋入式抗滑桩承担的滑坡推力分析 [J]. *工程力学*, 2020, 37(增刊 1): 187 – 192. [ AO Guiyong, ZHANG Yufang, ZHAO Shangyi, et al. Analysis of landslide thrust acting on embedded anti-slide pile[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(Sup 1): 187 – 192. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 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. [ QIU Zhihua. Arching effect of the pile frames and its numerical simulations[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2018, 32(3): 318 – 321. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] ZHAO Bo, WANG Yunsheng, WANG Yu, et al. Retaining mechanism and structural characteristics of h type anti-slide pile (hTP pile) and experience with its engineering application[J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 29 – 37
- [ 12 ] 赖杰, 郑颖人, 刘云, 等. 地震作用下双排抗滑桩支护边坡振动台试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(4): 680 – 686. [ LAI Jie, ZHENG Yingren, LIU Yun, et al. Shaking table tests on double-row anti-slide piles of slopes under earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(4): 680 – 686. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 胡爱国, 周伟. 地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 27 – 34. [ HU Aiguo, ZHOU Wei. Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 27 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 滑坡推力在悬臂式双排抗滑桩上的分配 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增刊 1): 2668 – 2673. [ SHEN Yongjiang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Distribution of landslide thrust on cantilever double-row anti-sliding piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Sup 1): 2668 – 2673. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 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) ]
- [ 16 ] 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. [ 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] XIAO Shiguo, ZENG Jinxiu, YAN Yuping. 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.
- [ 18 ] 曹岩. 平行布设双排抗滑桩受力特性试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019. [ Cao Yan. Experimental study on the mechanical behavior of double-row anti-slide piles installed in parallel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 刘伟. 无连梁双排抗滑桩受力特性的试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018. [ LIU Wei. Experimental study on the stress characteristics of double-row anti-slide pile without coupling beam[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] MA Xianchun, XIAO Yang, MENG Lu. Model test of cantilevered double-row anti-sliding piles in steeply slipping landslides[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 570(6): 062015.
- [ 22 ] 李永辉, 张信, 张鼎浩, 等. 曲面滑坡条件下 h 型抗滑桩受力性状模型试验研究 [J]. *工程力学*, 2024, 41(7): 134 – 146. [ LI Yonghui, ZHANG Xin, ZHANG

- Dinghao, et al. Model test on mechanical behavior of h-type anti-slide pile under curved landslide[J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(7): 134 – 146. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 赖纬明. 闽北山区土岩质边坡位移监测与稳定性分析 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019. [ LAI Weiming. Displacement monitoring and stability analysis of soil and rock slope in northern Fujian mountainous area[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 郑达, 梁力丹, 巨能攀. 低周往复荷载作用下预应力锚索震害特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1353 – 1360. [ ZHENG Da, LIANG Lidan, JU Nengpan. Seismic damage of prestressed anchor cables under low frequency cycling loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1353 – 1360. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 中华人民共和国国土资源部. 滑坡防治工程设计与施工技术规范: DZ/T 0219—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [ Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of design and construction for landslide stabilization: DZ/T 0219—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese) ]
- [26] 陈秋南, 周亚军, 马晓朋, 等. 基于双剪强度理论土拱效应的基坑支护桩间距分析 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 38 – 42. [ CHEN Qiunan, ZHOU Yajun, MA Xiaopeng, et al. Analysis of the spacing between retaining piles based on twin shear strength theory soil arching effect in pit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 38 – 42. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 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) ]
- [28] LAI Hanjiang, ZHENG Junjie, CUI Mingjuan, et al. “Soil arching” for piled embankments: Insights from stress redistribution behaviour of DEM modelling[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(8): 2117 – 2136.
- [29] 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) ]
- [30] GENG Zhe, JIN Dalong, YUAN Dajun. Face stability analysis of cohesion-frictional soils considering the soil arch effect and the instability failure process[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 153: 105050.
- [31] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104 – 1112. [ XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1104 – 1112. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 郭富赞, 张龙生, 王信, 等. 甘肃黑方台罗家坡滑坡演化过程及运动机制分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 11 – 20. [ GUO Fuzan, ZHANG Longsheng, WANG Xin, et al. Analysis on evolution process and movement mechanism of the Luojiapo landslide in Heifangtai, Gansu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 11 – 20. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 刘真真