文章编号:1005-0523(2025)01-0026-12



郑明新^{1,2},魏子坤^{1,2},胡 亮^{1,2},胡红萍³,聂宏智³

(1. 华东交通大学交通运输工程学院,江西南昌 330013; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能检测与 保障国家重点实验室,江西南昌330013;3. 南昌铁路勘察设计院有限责任公司,江西南昌330002)

摘要:针对围桩-土耦合式抗滑桩支护边坡时各围桩的受力情况有所差异等问题,以江西省某滑坡治理工程为背景,采用Midas GTS NX 有限元软件建立了围桩-土耦合式抗滑桩治理模型,探讨了不同围桩长度组合下结构的内力、位移变化规律,并分 析了不同配筋方式下围桩的受力变形特征。结果表明:减小中间及后排围桩的锚固比会导致前排围桩位移和内力增大,且围 桩锚固比的减小会使自身所受弯矩和剪力明显减小;当后排围桩锚固比不足1/3时,滑坡推力将不能通过围桩传递给稳定地 层;3种配筋方案进行对比,在达到安全要求情况下围桩统一配筋用筋量多、围桩变形小,拥有更好的治理效果和结构强度。 支护荷载单一的边坡时,优先采用考虑桩身受力特征的配筋方式;在支护荷载复杂的边坡时,优先采用各排单独配筋的设计 方式。

关键词:耦合式抗滑桩;非对称;桩身长度;配筋

中图分类号:U215 文献标志码:A

本文引用格式;郑明新,魏子坤,胡亮,等,围桩非对称设计对耦合桩受力特征的影响分析[J],华东交通大学学报,2025,42(1): 26-37.

Analysis of the Influence of Asymmetric Design of Surrounding **Piles on the Stress Characteristics of Coupling Piles**

Zheng Mingxin^{1,2}, Wei Zikun^{1,2}, Hu Liang^{1,2}, Hu Hongping³, Nie Hongzhi³

(1. College of Communication and Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Nanchang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330002, China)

Abstract: Aiming at the problem that the stress of each pile is different when the pile-soil coupling anti-slide pile is used to support the slope, taking a landslide control project in Jiangxi Province as the background, the Midas GTS NX finite element software is used to establish the pile-soil coupling anti-slide pile treatment model. The internal force and displacement variation of the structure under different pile length combinations are discussed, and the stress and deformation characteristics of the pile under different reinforcement methods are analyzed. The results show that the decrease of the anchorage ratio of the middle and rear piles will lead to the increase of the displacement and internal force of the front pile, and the decrease of the anchorage ratio of the pile will significantly reduce the bending moment and shear force. When the anchoring ratio of the rear pile is less than 1/3, the landslide thrust will not be transmitted to the stable stratum through the pile. By comparing the

收稿日期:2024-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51068006);江西省自然科学基金项目(20242BAB26078)

three reinforcement schemes, it is found that under the condition of meeting the safety requirements, the unified reinforcement of the pile is larger, the deformation of the pile is small, and the treatment effect and structural strength are better. When supporting a slope with a single load, the reinforcement method considering the force characteristics of the pile body is preferred. When supporting slopes with complex loads, the design method of separate reinforcement in each row is preferred.

Key words: coupling anti-slide pile; asymmetric state; pile length; reinforcement

Citation format: ZHENG M X, WEI Z K, HU L, et al. Analysis of the influence of asymmetric design of surrounding piles on the stress characteristics of coupling piles[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 26–37.

针对传统抗滑桩施工复杂困难、工程造价高以 及抗滑效果发挥不充分等问题,郑明新等¹¹¹提出了 一种围桩-土耦合式抗滑桩。该结构通过将所围土 体固在结构内部,并调动这部分土体强度与围桩共 同抵抗滑坡推力,因而拥有足够的抗滑力和稳定 性。围桩-土耦合式抗滑桩由6根小直径圆截面桩 并顶部连梁组合而成,是一种组合式抗滑结构,其 中的围桩可通过机械成孔完成施工^[2],具有施工方 便、耗材少、工程造价低、抗滑能力强等优势。

有关组合式抗滑结构,许多专家学者通过理论 计算、模型试验及数值仿真等方法从各种角度深入 研究,大多集中于对组合结构进行优化设计[3-4]。以 门架式抗滑桩为例,部分学者利用数值模拟的方 法,分析了门式抗滑桩的参数(前、后排桩长度及横 梁长度等)变化对桩身内力及位移变化规律的影 响,通过对3种参数的优化与组合,确定了门架式抗 滑桩的最佳设计参数[5-7]。除了通过改变锚固段长 度来控制桩长外,Shen等¹⁸提出了一种改变受荷段 长度的双排长短组合桩,首先基于缩尺试验计算得 出前、后排桩的最大弯矩,接着通过改变后排桩受 荷段长度来保证前、后排桩最大弯矩相等,得到了 后排桩的最佳桩长。不同受荷段长度的组合式抗 滑结构中,h型抗滑桩最具代表性,有关于h型桩的 优化设计也主要集中于对前、后排桩的最优锚固深 度的研究[9-10]。

抗滑桩作为一种特殊的侧向受荷桩,在滑坡推 力作用下桩体表现为一侧受拉、一侧受压,因此桩 身的抗弯和抗剪能力是抗滑桩设计中最重要的一 环,而且圆形截面桩与矩形截面桩配筋计算方式也 有所差异:张泽字^[11]、林久平等^[12]首先通过理论推导 的方式,推导出矩形截面和圆形截面各种配筋方式 下的抗弯承载能力,通过对比分析得到了圆形截面 抗滑桩的最佳配筋方法。此外,圆形截面桩的3种 配筋方式(沿圆周均匀配筋、沿圆周非均匀配筋、配 置矩形钢筋笼)各有优劣,其中非均匀配筋用筋量 少,静力作用下支护效果较好;均匀配筋和矩形钢筋 笼用筋量多,能适应如地震等较为复杂的工况^[13]。 秦龙等^[14]在对圆截面桩进行配筋设计时,不仅分别 计算了桩身受拉区和受压区的用筋量,还对纵向第 一排和第二排配筋进行长度优化,达到了减小抗滑 桩配筋用量的目的。陈再谦等^[15]、周春雷等^[16]都对 钢管桩的配筋形式进行研究,分别通过试验和数值 计算的方法,从桩身承载特性和抗滑效果出发,对 比了不同布筋方式下钢管桩的优劣。

目前对于耦合桩的研究主要是从结构整体出发,通过改变相邻围桩桩径、桩间距等来调节其力 学性能,而且对所有的围桩均采取相同的参数进行 设计^[17-18]。虽然这样的设计方式能确保结构抗滑效 果的稳定发挥,但是由于各排围桩所发挥的功能不 同(前排围桩受拉,后排围桩受压^[19])采取统一的设 计方式显然不够严谨。鉴于此,本文结合实际工程 建立数值模型,针对围桩长度不等长、各排围桩不 同配筋方式开展耦合式抗滑桩防治效果分析,剖析 了非对称设计下围桩的受力特征,为非对称围桩-土耦合式抗滑桩的设计提供依据。

1 工程背景

滑坡灾害位于江西省宜春市,勘察区内属构造 侵蚀溶蚀丘陵地貌单元,山体浑圆,地形标高 100.0~148.5 m,自然坡度一般为15°~35°,植被以油 茶等灌木为主,局部长有毛竹和茅草,覆盖率可达 70%以上,滑坡主要分布在村庄后,即110.0m高程 以上。现场勘察报告给出的滑坡勘察钻孔平面布 置图显示,1、2号钻孔位于西侧(1-1′剖面);3~5号 钻孔位于坡体中轴线(2-2'剖面);6、7号钻孔位于东 侧(3-3'剖面),图1为工程地质平面图。由于2-2'剖 面穿过张拉裂缝,较具代表性,本文将围绕该剖面 展开研究。



图1 工程地质平面图(单位:m) Fig.1 Engineering geological plan (Unit: m)

勘察结果表明,在长期降雨入渗作用下,坡体产生向下的变形滑移,并对其后部坡体产生牵引作用,进而导致滑坡的发生。其中滑体主要成分为粉质黏土,块石含量较高,坡脚滑体厚度一般为4.0~6.0 m。滑带主要位于土岩(粉质黏土和风化灰岩)分界面的粉质黏土部分,为受土应力影响较为集中的薄弱地带,厚度约为0.2 m,含水量高,一般为软塑状,其黏聚力和内摩擦角在天然状态下分别为c=14.5 kPa, $\varphi=10.5^{\circ}$;饱和状态下分别为c=13.5 kPa, $\varphi=10.0^{\circ}$ 。滑床主要由风化岩组成,相对滑体和滑带,该层较坚硬,被节理分割成片状或碎块状。根据工程地质测绘调查及勘探揭露,2-2'剖面如图2所示。

2 数值模型建立

2.1 耦合结构布设位置及模型尺寸

相较于普通抗滑桩而言,采用围桩-土耦合式 抗滑桩治理该滑坡的原因有:① 该滑坡滑体最厚处 不超过6.0 m,属于浅层滑坡;② 耦合式抗滑桩采用 钻孔成桩,施工便捷且安全;③ 由于滑坡诱因与地 域长时间降雨有关,因此结构的排水作用也应考虑 在内,而耦合式抗滑桩由6根小直径桩组成,围桩间 距大,利于结构排水。





简化 2-2'剖面,如图 3 所示。模型尺寸长×高× 宽=130.0 m×60.0 m×20.0 m,模型从上至下依次为 滑体(深 5.0 m)、滑带(厚 0.2 m)、滑床及嵌入各土层 的围桩-土耦合式抗滑桩。其中耦合桩中围桩直径 *d*取 0.5 m,围桩间距 *D*=4*d*^[20]。单个耦合式抗滑桩 最佳平面布置形式如图 4;模型中布设两个耦合式 抗滑桩,二者间距 *S*=10.0 m,即为耦合式抗滑桩距 边界计算阈长度的两倍,如图 5 所示。

2.2 材料参数及有限元模型

根据现场勘察报告并结合相关文献资料,本次 数值模型相应结构材料参数见表1和表2。



图 3 简化模型剖面图 Fig. 3 Simplified model section



图 4 围桩平面布置形式 Fig. 4 Surrounding pile plane layout form



图 5 数值模型中耦合桩的布设 Fig. 5 Numerical model coupled structure layout

表1 土层参数 Tab.1 Soil layer parameters

土层	γ/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
滑体	20.70	30.000	36.60	28.00	0.28
滑带	21.00	9.996	13.50	10.00	0.30
滑床	22.31	65.000	52.00	43.00	0.22

	表2 结构材料参数	
Tab.2	Structural material parameter	S

结构	$\gamma/(kN/m^3)$	弹性模量/MPa	泊松比
桩顶连梁	26.0	26 000	0.10
围桩	25.0	26 000	0.12

模型中土层采用 Mohr-Coulomb 本构模拟,桩 顶连梁和围桩采用弹性本构模拟。模型中围桩采 用梁单元模拟,其余部件采用实体单元模拟;模型 前后约束 X向位移,左右约束 Y向位移,底部固定, 并为围桩添加 Z向转动约束。此外,还须添加界面 单元来模拟桩土之间的接触效果,剪切刚度模量值 取 20 MPa,法向刚度模量取值为剪切刚度模量的 10倍^[21]。有限元模型见图6。



图6 有限元模型 Fig.6 Finite element model

2.3 不等长耦合桩数值方案设计

由《抗滑桩治理工程设计规范》(T/CAGHP 003—2018)可知,抗滑桩锚固段长度与桩身总体 长度的比值区间应在 1/4~1/2,结合工程背景及数 值模型中耦合式抗滑桩的布设位置,对照组(现有 等长围桩-土耦合式抗滑桩)桩身长度取 10.0 m;同 时控制前排围桩长度不变,中间及后排围桩锚固 段占比^[22]在 1/4(6.7 m)、1/3(7.5 m)及 2/5(8.4 m)中 取值并组合,且始终保持 L>L₁>L₂(L,L₁,L₂分 别代表前中后三排围桩),如图 7所示,相应工况设置如表 3 所示。

2.4 耦合桩配筋及数值方案设计

2.4.1 配筋方案设计

基于上述工况,以方案1(前、中、后排围桩均为 10.0 m)为设计计算对象,对耦合桩的配筋方式开展



图 7 不等长围桩-土耦合式抗滑桩 Fig. 7 Unequal length surrounding pile-soil coupled anti-slip pile

Fab.3	Group	of numerical conditions of anchoring depth
	表3	非等长围桩锚固深度数值工况分组

of non-isometric coaming pile m			
方案	L	L_1	L_2
方案1(各排围桩等长)	10.0	10.0	10.0
方案2	10.0	8.4	7.5
方案3	10.0	8.4	6.7
方案4	10.0	7.5	6.7
方案5	8.4	7.5	6.7

数值研究。根据剩余滑坡推力法计算出设桩处最 大剩余滑坡推力为 E₁=610.35 kN/m,剩余滑体抗 力 E₂=331.50 kN/m。参考普通抗滑桩内力计算方 法,耦合体受荷段部分以悬臂桩法计算,根据文献[23] 给出的滑坡推力及抗滑力分布形式,可计算出耦合体 滑面处弯矩为1887.01 kN·m,剪力为2789.00 kN, 再根据k法计算出耦合体锚固段内力,最终计算得到 桩-土耦合体的最大弯矩为3695.10 kN·m,最大剪力 为2789.00 kN。根据桩土分离算法^{[11}可求出全部围 桩承担的弯矩和剪力分别为 $M_{\text{IBH}} = 3066.00$ kN·m, $Q_{\text{IBH}} = 2282.30$ kN。基于现有耦合式抗滑桩内力分 配比,此处给出后、中、前各排围桩弯矩和剪力分 配比^{[11}为 $M_{\text{E}}:M_{\text{H}}:M_{\text{H}}=1.10:1.00:0.90, Q_{\text{E}}:Q_{\text{H}}:Q_{\text{H}}=$ 1.15:1.00:0.85,将弯矩和剪力分配给每排围桩后,再 对围桩进行配筋。

选取C30作为围桩桩身混凝土材料,钢筋使用 HRB400,混凝土保护层厚度取40.0mm。由圆形截面 抗滑桩配筋计算公式,求出每排围桩所需的钢筋用 量,如表4所示。 &表示二级钢筋。3种配筋方案如下:

表4 各方案围桩配筋情况 Tab.4 Surrounding pile reinforcement in each scheme

方案	加载方式	后排围桩(1#,2#)	中间排围桩(3*,4*)	前排围桩(5#,6#)
方案1		19\$25	19\$25	19\$25
方案2	逐级加载	19\$25	28\$20	31\$18
方案3		19\$25	9\$\pm25,15\$\pm18	31\$18

配筋方案1:以最大弯矩和剪力对各排围桩统一 配筋,结构中每根围桩纵筋使用面积为9257.8 mm²;

配筋方案2:对各排围桩分别配筋设计,计算得 出后排、中间、前排围桩纵筋面积分别为9257.8, 8750.0,7826.7 mm²;

配筋方案3:考虑到耦合式抗滑桩各排围桩的 受力特征差异,将中间排围桩的配筋分为受拉区和 受压区两部分,如图8所示,中间排围桩后侧钢筋 型号与后排围桩相同,前侧钢筋型号与前排围桩 相同,则后、中、前排围桩纵筋面积分别为9257.8, 8235.6,7826.7 mm²。



图8 耦合桩中各围桩受力特征

Fig. 8 Force characteristics of each perimeter pile in a coupled pile

2.4.2 围桩-钢筋笼模型网格划分及荷载设置

采用上述数值模型继续进行研究,由于需要模 拟围桩身内部的配筋,所以此处围桩的建模应由两 部分组成:即桩身混凝土以及钢筋笼。此处的桩身 混凝土以实体单元模拟,并采用塑性损伤本构模 型,钢筋用植入式梁单元模拟。同时,桩身由梁单 元改变为实体单元仅仅是改变了围桩在模型中的 展现形式,围桩的尺寸参数等并未发生改变,因此 梁单元与实体单元之间的转换并不矛盾,也不会影 响模型的计算结果。各配筋方案下围桩钢筋笼的 网格划分如图9所示。为探讨不同配筋形式对耦合 桩支护效果及围桩强度的影响,在滑体最上方施加 荷载,以逐级加载的方式从 5~20 kPa 每次施加 5 kPa 压强;20~80 kPa 每次施加 10 kPa 压强,观察各 配筋方案的耦合桩在不同外载作用下的支护效 果。加载区域如图 10所示。

3 计算结果分析

3.1 不等长耦合式抗滑桩数值模型计算结果分析

3.1.1 稳定性分析

表5中各工况的稳定系数是分别通过折线系数 法(《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T



图 9 钢筋笼网格划分 Fig. 9 Reinforcing cage mesh division



图 10 加载示意图 Fig. 10 Loading diagram

表5 不同计算方法稳定系数对比

 Tab.5
 Comparison of stability coefficients of different

calculation methods					
方法	自重	自重+暴雨			
折线系数法	1.020 0	0.970 0			
数值法	1.012 5	0.962 5			

0219—2006))和数值仿真模型计算得出的,两种计算结果相差仅0.7%左右,说明本次数值仿真模型所模拟的边坡及计算结果均可靠,可在该有限元模型的基础上作进一步影响参数分析。

图 11(a)和图 11(b)分别为采用耦合桩支护前 后边坡最大剪切应变云图。由图可知,支护前滑裂



(a) 支护前

面由上至下完全贯通,边坡变形失稳;支护后(方案 1)潜在滑带在设桩处附近消失,说明围桩-土耦合 式抗滑桩有效阻挡了滑动带的延续,提高了边坡的 稳定性。对比支护前后边坡稳定性系数发现,支护 前边坡稳定系数 $F_s = 0.9625$,根据《滑坡防治工程 勘查规范》(GB/T 32864—2016)可知, $F_s < 1.05$ 时, 边坡处于不稳定状态;支护后边坡安全系数 $F_s = 1.2823 > 1.15$,说明支护方案可行。方案2~方 案 5 安全系数分别为 1.282 1, 1.281 8, 1.281 5, 1.280 4,可以看出,在符合安全范围内调整后排及 中间围桩长度对耦合式抗滑桩治理效果影响很小。 3.1.2 位移分析

图 12 为不同桩长组合下各排围桩桩身水平位 移随桩深变化情况。由图可知:

 1)总体上桩体水平位移变化趋势一致,最大位 移均出现在围桩顶部,且沿围桩埋深向下,桩体水 平位移逐渐减小;

2)进一步分析可知,在滑动面以下,方案5的前、中间及后排围桩,方案4的中间及后排围桩,其对应位移趋势明显不同于其他围桩,具体表现为: 桩底位移小,桩顶位移大,此时的桩体倾斜角度会更大,在滑坡推力作用下更容易发生倾覆破坏;





图 11 支护前后边坡最大剪切应变云图 Fig. 11 Maximum shear strain of the slope before and after the support



图 12 不同方案各排围桩桩身水平位移变化曲线

Fig. 12 Variation curves of horizontal displacement of each row of perimeter piles under different schemes

3) 当前、中、后排围桩锚固比分别小于1/2 (10.0 m)、2/5(8.4 m)、1/3(7.5 m)时,桩身锚固段底 部水平位移值并未趋于稳定,说明桩体锚固深度并 不足;结合上述2)分析可知,耦合桩前、中、后排锚 固比临界值依次为1/2、2/5和1/3,小于该临界值时, 耦合桩的支护效果将大幅削弱。

图 13 为不同治理方案下的坡脚 Y 向位移曲 线。由图可知,同一方案的坡脚位移值在耦合式抗 滑桩中心轴线处最小,在模型整体Y向中心轴线处 位移最大。对比不同方案的坡脚位移曲线可知,后 排及中间围桩的锚固深度越小,坡脚水平位移越大, 其中采用方案1治理的滑坡其坡脚位移值最小,采用 方案2支护的滑坡其坡脚位移值与方案1最为接近, 仅增大了0.46%,同时还节省了14%的材料用量。 3.1.3 内力分析



图 14 为前文中通过 k 法和数值法分别计算出

图13 各支护方案坡脚水平位移曲线 Fig. 13 Horizontal displacement curves of the slope toe





的各桩最大弯矩和最大剪力,由图可知,两种计算 方法所得弯矩和剪力数值相仿,说明所建立的数值 模型及相关计算结果较为合理,可在此基础上做进 一步分析。

1) 各排围桩桩身弯矩分析。图 15 为不同方案 各排围桩桩身弯矩随桩深变化情况。

由图15(a)可知,各方案前排围桩最大弯矩值 均出现在埋深6.0~7.0m,当控制前排围桩锚固比不 变时,后排及中间排围桩长度的减小会导致前排围 桩弯矩增大。其中方案2~方案4弯矩最大值相较 于方案1分别增大了1.05%,1.95%,2.92%,减小前 排围桩锚固比会导致锚固段桩身弯矩明显减小。

由图15(b)可知,随着中间排围桩锚固深度的 变化,此排围桩桩身最大弯矩值出现位置也在发生 变化, 仅方案1(10.0 m), 方案2(8.4 m) 和方案3 (8.4 m)的中间排围桩桩身弯矩最大值位于滑面以



图 15 各排围桩不同方案桩身弯矩变化曲线

Fig. 15 Variation curves of bending moment of pile body with different schemes for each row of surrounding piles

下,方案4(7.5 m)和方案5(7.5 m)桩身最大弯矩值则出现在滑面以上。

由图 15(c)可知,不同方案后排围桩桩身弯矩 极值点数量有明显不同,当后排围桩长度为6.7 m(锚 固比为 1/4)时,弯矩变化曲线有且仅有一个极值 点,且位于不稳定土层(滑体土)中,说明此时的围桩 并没有将滑坡推力传递至滑床,未起到支护边坡的作 用;而当后排围桩长度为7.5 m(锚固比为1/3)时,桩身 弯矩变化曲线存在两个极值点,但弯矩最大值位于 滑面以上,此时应对滑面以上的桩体加密配筋。

2) 各排围桩桩身剪力分析。图 16 为不同方案 各排围桩桩身剪力随桩身变化情况。

由图 16(a)可知,前排围桩剪力变化曲线存在3 个极值点,最大剪力值出现在滑带附近;且当保持 前排围桩桩身长度不变时,减小后排及中间排围 桩长度会导致前排围桩剪力增大。其中方案 2~方 案 4 剪力最大值相较于方案 1 分别增大了 4.38%, 5.90%,6.54%。

图 16(b) 为不同方案中间排围桩桩身剪力变化

曲线,对比方案2和方案3可知,后排围桩锚固比的 改变基本不影响中间排围桩桩身剪力大小,而对比 方案2和方案4可知,中间排围桩锚固比由2/5变为 1/3时,其自身剪力最大值减小了13.51%,剪力值发 生了明显的改变。

对比前排及中间排围桩,图 16(c)后排围桩桩 身剪力变化曲线最大的不同之处在于:方案 3~方案 5 的剪力变化曲线仅有两个极值点,剪力最大值位 于滑面以上4.0 m左右,说明此时的围桩已经失去 阻滑能力。

综上,通过对比桩身位移及坡脚位移可知,方 案2与方案1(各桩锚固比均为1/2)支护效果相仿; 此外,方案2中各排围桩弯矩和剪力差值更小,说明 控制前排围桩长度不变,在一定范围内减小中间及 后排围桩的长度能使各桩的内力分配更加均匀,围 桩抗滑效果发挥更充分,同时减少了14%的钢筋混 凝土用量。方案5较其他方案缩短了前排围桩的长 度,但导致各排围桩桩体位移均明显增大,支护效 果差。因此在设计不等长耦合式抗滑桩时应优先





Fig. 16 Variation curves of pile shear force with different schemes for each row of surrounding piles

保证前排围桩的锚固比不应小于1/2;中间排围桩 锚固比应控制在2/5~1/2最佳;后排围桩锚固比控 制在1/3~1/2最佳。

3.2 围桩配筋数值模型计算结果分析

3.2.1 桩身塑性应变分析

在Midas/GTS中,当C30混凝土受拉算损伤达 0.974 406及以上时,即可认为混凝土构件发生了受 拉破坏。各方案桩身混凝土首次出现受拉损伤破 坏的云图如图17所示。经计算,方案1和方案2均 加载至15 kPa时出现了受拉损伤区,二者受拉损伤 区域占比分别为2.6%、2.7%;而方案3仅加载至10 kPa时便出现了受拉损伤区,且损伤区占比0.8%。 此外,在15 kPa的压力作用下,采用方案1和方案2 配筋方式的耦合式抗滑桩后排及中间围桩桩身混 凝土均出现了受拉损伤区,前排围桩尚未出现损伤,直到加载至20 kPa时二者前排围桩破坏点才逐渐出现;方案3在10 kPa的压力作用下仅后排围桩出现了受拉损伤破坏,加载至15 kPa时中间及前排围桩才逐渐出现破坏点,说明采用配筋方案3设计的耦合桩支护效果及结构强度不如前两者,但在支护无其他外载的边坡时仍能满足支护要求。

结合方案1和方案2的后排及中间围桩损伤云 图可知,围桩-土耦合式抗滑桩在抵抗滑坡推力过 程中,后排围桩最先受到破坏,其次是中间和前排 围桩。且由图17可以看出,3种配筋方案下,围桩 桩身混凝土首次出现受拉破坏点的位置都是从滑 带开始,然后逐渐向四周发展,最终发展成塑性损 伤区。





图 18 是配筋方案 3 的耦合桩从受力到发生受 拉破坏的 3 个过程,从图中明显可以看出,不仅各排 围桩后侧出现了受拉损伤破坏区域,在滑带以上部 分的各围桩前侧也出现了大面积的损伤破坏区域, 这与普通抗滑桩是截然不同的。分析其原因是围 桩顶部连梁限制了围桩桩顶位移,如图 18(c)所示, 虚线表示若没有桩顶连梁时围桩应有的变形情况, 加入连梁后约束了桩顶部分位移,这就导致位于滑 面以上的各围桩桩身前侧受拉,且随着荷载的增 大,其受拉损伤区域也会不断扩张。同时,结合图 18(c)还能看出,随着围桩后侧受拉损伤区域沿桩 身向上发展,围桩前侧受拉损伤区域沿桩身向下发 展,两部分损伤区域在滑带以上 1.0 m处交汇,此时 后排围桩破坏;作为一种组合式抗滑桩,后排围桩 破坏后会导致中间及前排围桩瞬间破坏,结构因此 失去抗滑效果。

3.2.2 位移分析

3种配筋方案围桩桩顶在不同压力作用下的水 平位移情况如图19所示。在自重作用下,3种配筋 方案均满足治理要求。桩身混凝土损伤初期,方案 3桩顶位移较大且突变较早,表明其结构强度弱于 方案1和方案2。桩身破坏后,荷载-位移曲线斜率 增大,抗滑能力骤减,桩顶位移增速加快。方案3桩 顶位移出现两次突变:首次在5~10 kPa,因混凝土 初次破坏;第二次在70~80 kPa,因围桩前后损伤区 交汇导致彻底破坏。



图 18 围桩受拉破坏过程(配筋方案3) Fig. 18 Destructive process of perimeter piles in tension (reinforcement scheme 3)



图 19 不同荷载作用下桩顶水平位移曲线图 Fig. 19 Horizontal displacement curve of pile top under different loads

4 结论

利用 Midas GTS NX 软件建立围桩-土耦合式 抗滑桩滑坡治理数值模型,对各排围桩不同锚固比 组合下的耦合式抗滑桩支护效果及围桩的位移、内 力分布规律进行了分析;同时根据各排围桩的受力 特点为耦合式抗滑桩设计了3种不同的配筋方式, 并建立相应的数值模型探讨了不同配筋方式的优 劣。得到以下结论。

1)减小中间及后排围桩的锚固比,会导致前排
 围桩的内力和位移增大;且围桩锚固比的减小会使
 自身弯矩和剪力明显减小。

2)设计不等长耦合式抗滑桩时,应保证前排围 桩锚固比不小于1/2;中间排围桩锚固比在2/5~1/2 为宜;后排围桩锚固比在1/3~1/2最佳;当各排围桩 锚固比小于给定区间时,围桩将不能发挥支护效 果,大幅削弱耦合桩的抗滑能力。

3) 在无其他外荷载作用时,3种配筋方式均能 满足支护效果,相较于围桩统一配筋(配筋方案1), 考虑桩身受力特征的配筋方式(配筋方案3)用筋量 少,但是在外载较大时容易破坏,在边坡无其他复 杂荷载情况下可考虑采取该种配筋方式;各排围桩 单独配筋(配筋方案2)承载力较强,用筋量稍多于 方案3,但较方案1少,在支护外载较复杂的边坡 时,可优先考虑该种配筋方案。

参考文献:

- 郑明新, 雷金波, 胡国平, 等. 新型围桩-土耦合式抗滑 结构研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2021.
 ZHENG M X, LEI J B, HU G P, et al. Study on a new type of surrounding pile-soil coupling anti-sliding structure [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2021.
- [2] 郑明新. 新型抗滑结构研究现状与发展趋势[J]. 华东交 通大学学报, 2019, 36(5): 1-9.
 ZHENG M X. Research status and development trend of new anti-slide pile structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(5): 1-9.
- [3] 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 P B, YAN C H, WAN J J, et al. Design parameter optimization and deformation analysis of portal anti-slide pile[J]. Geological Review, 2022, 68(1): 195-204.
- [4] 陈权川, 徐庆方, 谢配红, 等. 含软弱夹层缓倾顺层岩质 边坡中抗滑桩-键组合结构的应用[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(4): 131-140.
 CHEN Q C, XU Q F, XIE P H, et al. Application of antisliding pile-key combination structures in gently inclined

bedding rock slope with soft interlayer[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(4):131-140.

- [5] QIAO S, XU P, TENG J, et al. Numerical study of optimal parameters on the high filling embankment landslide reinforced by the portal anti-slide pile[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(6): 1460-1475.
- [6] 王栋. 后排桩长度变化对双排桩的影响分析[J]. 建材技术与应用, 2022(4): 15-19.
 WANG D. Analysis of the influence of length change of

back pile on double row pile[J]. Building Materials Technology and Application, 2022(4): 15-19. [7] 龚宏华,周旭明,詹刚毅,等.紧邻铁路偏压基坑长短桩
 围护结构受力变形分析[J].华东交通大学学报,2023,40(2):1-8.

GONG H H, ZHOU X M, ZHAN G Y, et al. Test analysis of stress and deformation of long- short pile retaining structure adjacent to railway asymmetric load foundation pit[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023,40 (2):1-8.

- [8] 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.
- [9] 张泽坤. h型抗滑桩的有限元分析[D]. 成都: 西南交通 大学, 2008.

ZHANG Z K. Finite element analysis of h-type slide-resistant pile[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

- [10] YOU C, XING H F. Study on the structure optimization of h-type anti-slide pile[C]//Nanchang: Proceedings of the 6th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering, 2020.
- [11] 张泽宇. 矩形与圆形截面抗滑桩受力特性对比研究[D]. 西安:长安大学, 2021.

ZHANG Z Y. Comparative study on the mechanical characteristics of rectangular and circular anti-slide piles[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.

- [12] 林久平,高明永. 圆形截面在抗滑桩中的应用及配筋计算[J]. 公路, 2022, 67(7): 117-121.
 LIN J P, GAO M Y. Application of circular section in anti-sliding pile and reinforcement calculation[J]. Highway, 2022, 67(7): 117-121.
- [13] 陈涛. 圆形截面抗滑桩合理配筋方式研究[D]. 西安: 长 安大学, 2021.

CHEN T. Research on rational reinforcement method of anti-slide pile with circular section[D]. Xi' an: Chang' an University, 2021.

- [14] 秦龙, 廖俊, 袁奇. 非通长配筋圆形抗滑桩在路堤边坡 中的应用[J]. 交通科技, 2017(2): 42-44.
 QIN L, LIAO J, YUAN Q. Application of circular antislide pile with non-straight length reinforcement in embankment slope[J]. Transportation Science and Technology, 2017(2): 42-44.
- [15] 陈再谦, 帅世杰, 蒲黍條, 等. 微型抗滑桩极限抗弯承载 力试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41 (5): 59-66.

CHEN Z Q, SHUAI S J, PU S T, et al. Study on the ultimate flexural bearing capacity of micro anti-slide piles[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 59-66.

[16] 周春雷, 舒中文, 刘欣, 等. 加筋微型钢管桩配筋优化及 受力特征[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13870-13879.

ZHOU C L, SHU Z W, LIU X, et al. Reinforcement optimization and stress characteristics of reinforced micro steel pile[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13870-13879.

[17] 李培植. 微桩-土耦合式抗滑桩计算方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2007.

LI P Z. Research on calculating method of micropile-soil coupling anti-slide pile[D]. Nanchang: East China Jiao-tong University, 2007.

[18] 刘伟宏. 围桩-土耦合式抗滑结构工作机理研究[D]. 南
 昌: 华东交通大学, 2012.
 LIU W H. Research on working mechanism of pile-soil

coupling anti-sliding structure[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2012.

- [19] 孔祥营. 基于 FLAC3D 耦合式抗滑桩作用机理研究[D]. 华东交通大学, 2014.
 KONG X Y. Study on the action mechanism of FLAC3D coupled anti-slide pile[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.
- [20] 刘伟宏. 围桩-土耦合式抗滑结构室内试验[J]. 武汉大 学学报(工学版), 2013, 46(4): 494-498.

LIU W H. Indoor model test on surrounding pile-soil coupling anti-slide structure[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013,46(4): 494-498.

- [21] 杨尧. 客运专线铁路基床填料动静三轴试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
 YANG Y. Static and dynamic triaxial test study of filler for passenger dedicated railway foundation bed[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [22] 周春梅,殷坤龙,简文星.滑动面倾斜时抗滑桩弹塑性

区临界高度的计算[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1949-1954.

ZHOU C M, YIN K L, JIAN W X. Calculation of critical height of rock- soil elastoplastic area before anti-slide pile on declining sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1949-1954.

[23] 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 Z H. 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.



第一作者:郑明新(1966—),男,教授,博士,博士生导师,研 究方向为边坡稳定与道路工程灾害整治。 E-mail:492001473@qq.com。



通信作者:魏子坤(1998—),男,硕士研究生,研究方向为边 坡支护结构。E-mail:279971747@qq.com。

(责任编辑:吴海燕)