

滑坡抗滑短桩的受力特性模拟研究

李乾坤^{1,2}, 蔡强^{1,2}, 梁炯^{1,2}, 张勇^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;
2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 611734)

摘要: 抗滑短桩是滑坡常用的治理措施之一, 应用较为广泛, 但其承载机理尚不清晰。采用FLAC^{3D}模拟程序建立不同长度抗滑短桩加固滑坡的数值模型, 分析滑坡模型变形特征以及抗滑短桩受力特性, 进一步揭示抗滑短桩加固滑坡的受力特性。研究结果表明: (1) 不同长度的抗滑短桩可显著提高滑坡的整体稳定性; (2) 随着抗滑短桩桩长的增加, 桩身受力趋于均匀, 桩-土协同作用增强, 滑体最大位移逐渐降低, 但降低速率减小; (3) 自由段桩长与滑体厚度比值 <0.6 时, 滑坡出现“越顶”破坏现象; (4) 建议抗滑短桩的自由段长度与滑体厚度比值取为 $0.7\sim0.9$ 。

关键词: 滑坡; 抗滑短桩; 受力特性; 越顶; 数值模拟

中图分类号: P642.22; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)05-0029-07

Numerical simulation for mechanical characteristics of short anti-sliding pile

LI Qiankun^{1,2}, CAI Qiang^{1,2}, LIANG Jiong^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, MNR, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Short anti-sliding pile is widely used as the common treatment measures to landslide, however, its bearing mechanism is not clear. In this paper, the software of Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension (FLAC^{3D}) is used to build numerical model of anti-sliding piles to reinforce landslides with different length, the characteristics of deformation of the landslide model and the mechanics of the anti-sliding piles are analyzed, and the mechanics to reinforce the landslide is further revealed. The results show that: (1) the stability of the slope can be increased obviously with the reinforcement by short anti-sliding pile with different length; (2) with the increase of the short pile length, the stress of the pile spreads more evenly, and the integrity of the pile and soil is better, the maximum displacement of slope is reducing with lower reduce rate; (3) The slope destroyed cross over the pile when the ratio of the pile's free section length to the thickness of the landslide is less than 0.6; (4) the ratio of the pile's free section length to the thickness of the landslide is suggested to be $0.7\sim0.9$.

Key words: landslide; short anti-sliding pile; bearing mechanism; cross over the pile; numerical simulation

0 引言

抗滑短桩又称埋入式抗滑桩, 是在传统抗滑桩的基础上发展起来的, 为桩顶标高低于滑坡体表面一定深度的抗滑桩^[1], 适用于滑体强度明显大于滑

面强度的滑坡, 且无浅层滑坡, 仅需通过对滑带及其附近的加固即可提高整体稳定性。抗滑短桩因其刚度大、桩长短, 其受力将大大降低, 可显著降低滑坡工程造价, 是滑坡防治工程中一项重要的技

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-06-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.05.005

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质灾害防治技术应用”(编号: DD20230087)

第一作者: 李乾坤, 男, 汉族, 1986年生, 工程师, 工程力学专业, 长期从事地质灾害防治技术研究及调查评价工作, 四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号, 44226118@qq.com。

引用格式: 李乾坤, 蔡强, 梁炯, 等. 滑坡抗滑短桩的受力特性模拟研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 29-35.

LI Qiankun, CAI Qiang, LIANG Jiong, et al. Numerical simulation for mechanical characteristics of short anti-sliding pile[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 29-35.

术,近年来得到大量推广和应用^[2]。

对于抗滑短桩,在其他条件不变情况下,桩长增加会逐渐提高滑体的稳定系数,但会增加桩身受力,使其增加桩身截面面积才能发挥其承载能力,因此,增加桩长可能带来较大的安全隐患和较高的工程造价^[3]。抗滑短桩能够与桩周土体产生明显的桩-土协同作用,在进行抗滑短桩设计时,考虑桩-土协同作用的情况,作用于桩身的剩余下滑推力比不考虑时减小约10%^[4]。在抗滑短桩应用过程中,抗滑短桩的桩顶标高通常低于坡表标高,可能会产生越顶现象,雷用等^[5]对重庆云阳县太公沱至余家包库岸大咀段库岸采用抗滑短桩治理的工程进行了有限元分析,得出该段库岸滑坡采用桩长12 m的抗滑短桩支护,能够满足稳定性要求。蔡强等^[6]开展了钢管抗滑短桩受力特性物理模型试验研究,得出钢管短桩能发挥抗滑效果的桩长下限值,即钢管抗滑短桩位于滑体中的长度应不小于滑体厚度的2/3。曾红艳等开展了抗滑短桩支护土坡的试验研究,研究了不同长度的抗滑短桩对土坡的支护作用机理,认为在实际工程中应联合使用抗滑短桩与坡脚挡墙以同时加固深层土体及浅层坡土确保整个边坡达到稳定安全状态^[7],同时建议对可能出现的越顶现象及浅层滑动,建议采用抗滑短桩联合坡脚挡墙共同加固^[8]。针对抗滑短桩加固边坡产生的“越顶破坏”现象,李旭等^[9]提出了抗滑短桩通过竖向植筋带锚拉坡面网格梁兼顾浅层和深层防护的边坡加固技术,并采用数值计算的方法对其进行研究,得出抗滑短桩锚拉竖向植筋带能够承担部分下滑推力,使降雨结束后边坡从无加固时的失稳状态转变为相对稳定状态,有效避免了边坡浅层土体“越顶破坏”现象的发生。陈权川等^[10]揭示了抗滑键在含软弱夹层缓倾顺层岩质边坡中的承载性能与破坏模式。抗滑短桩在滑坡防治工程应用较为广泛,但工程技术人员在抗滑短桩设计时通常依靠经验设定桩长和截面尺寸,缺乏一定的理论依据,导致抗滑短桩存在一定的安全隐患。因此,需要开展深入的抗滑短桩的承载机理研究,为抗滑短桩桩长和截面尺寸等参数提供理论依据。

目前,滑坡抗滑桩工程主要采用数值模拟的方法,如大型有限元分析^[11-16]。近年来,岩土工程中逐渐选择更适宜于地质岩土体分析的快速拉格朗日差分分析软件(FLAC^{3D})^[17-21]。FLAC^{3D}程序采用显示

有限差分原理,采用快速拉格朗日算法可以模拟岩土体的三维力学行为,且该算法在计算中不形成刚度矩阵,不需要迭代满足弹塑性应变关系,仅需要通过应变来计算应力,因此对于大体积、划分单元较多的非线性岩土体分析是较为适宜的^[22-23]。

基于此,本文采用FLAC^{3D}软件,建立抗滑短桩加固滑坡的数值模型,分析滑坡模型变形特征以及抗滑短桩受力特性,进一步揭示抗滑短桩加固滑坡的受力特征,提出合理的桩长范围,研究成果对于抗滑短桩的优化设计具有一定的指导意义。

1 数值模型及参数

抗滑短桩加固滑坡的数值模型采用FLAC^{3D}程序模拟。滑坡模型(图1)尺寸为240×100×180 cm,由滑体、滑床和滑面组成,其中滑体和滑床采用FLAC^{3D}自带的四面体单元构成,滑面由接触面单元模拟。滑体、滑床和滑面均服从Mohr-Coulomb破坏准则^[17],模拟参数见表1。该滑坡数值模拟是根据已开展的物理模型试验^[6]建立的,在物理模型中,滑床采用强度等级为42.5R的水泥与黄粘土混合调配而成,用以模拟完整性较好的基岩层,水泥:黄粘土质量比为1:10,黄粘土的含水率约10%。滑体土采用粉碎并筛分的砂岩条石与粉质粘土充分搅拌而成,保证粒径>2 mm的颗粒质量超过滑体土总质量的50%,使滑体土有一个良好的级配。再根据滑体土的干湿程度对其含水率进行适当调整,将土体的含水率控制在10%~20%。滑床和滑体经分层埋填、夯实之后,经测试,得到滑坡模型计算参数。

抗滑短桩由桩(Pile)单元模拟^[18],模拟参数见表2。为探究不同桩长 l 条件下的抗滑短桩承载

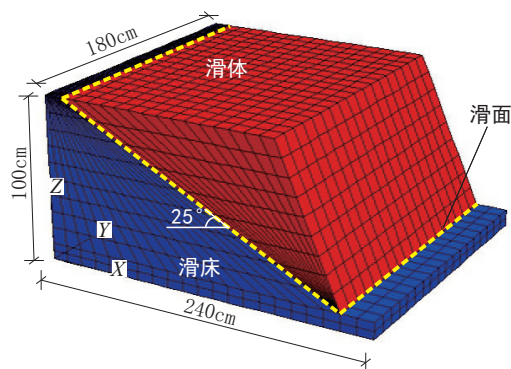


图1 滑坡网格模型

Fig.1 Grid model of the landslide

表 1 滑坡模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of the landslide model

土体	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa	内聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)
滑床	15600	10800	2	60×10 ⁶	48	2800
滑体	0.119	0.109	1	6×10 ³	24	1800

机理,共设计 6 种工况,桩长分别为无桩 0、50、60、70、80 和 90 cm,其中 90 cm 为长桩,可用于对比抗滑短桩与长桩的加固的区别。对应自由段桩长与滑体厚度比值为 0、0.6、0.7、0.8、0.9 和 1.0。考虑到抗滑短桩在滑体中的最短长度不宜小于滑体厚度的 1/4,岩层嵌固段的深度不宜小于抗滑短桩总长的 1/4^[1],锚固段长度为 0.3 l ,抗滑桩直径 D 为 30 mm,为了消除土拱效应,仅考虑单桩对边坡加固的影响,通常产生土拱效应的间距为 $(1\sim6)D$,在本文中设定抗滑桩桩间距为 30 cm $> 6D=18$ cm。

表 2 桩单元计算参数

Table 2 Calculation parameters of the pile

结构	弹性模 量/GPa	泊松 比	周长/ m	截面积/ m ²	极惯性矩/ m ⁴
桩	3.9	0.3	0.0942	0.000765	4.96×10 ⁻⁹

根据前期的模型试验,当滑坡上方堆加的荷载达到 94.95 kN 时滑坡开始出现变形破坏^[6,24],因此将滑坡上覆荷载设定为 94.95 kN,滑坡顶部的面积为 2.52 m²,换算成均布荷载为 37.68 kPa,通过 FLAC^{3D} 中面荷载对滑坡模型施加该荷载。

2 数值模拟结果分析

2.1 模型整体位移分析

图 2 是抗滑短桩在相同滑坡荷载下,不同桩长条件下的滑坡位移云图和位移矢量图。由图 2 可知:

(1)在无桩条件下,滑体沿滑面失稳破坏,楔形体前缘中部滑体剪出破坏(图 2a)。

(2)当桩长为 50 cm(图 2b)和 60 cm(图 2c)时,滑体前缘上部形成贯通的滑面,对比无抗滑短桩的滑坡位移云图可知,加固后的滑坡滑体仅顶部产生局部破坏。

(3)当桩长为 70 cm(图 2d)、80 cm(图 2e)和 90 cm(图 2f)时,滑坡未发生失稳现象,滑坡土体仅在

抗滑短桩后发生一定的变形,表明桩-土协同作用显著。

(4)如图 3 所示,数值模拟记录了滑体最大位移随桩长的变化数据,图中显示,随着桩长的增加,模型整体位移呈减小趋势,但减小的幅度逐渐减小,表明增加抗滑短桩长度可增加滑坡稳定性,但对滑坡稳定性控制效果逐渐减弱。

2.2 土体应力分析

滑坡土体的应力尤其桩周围土体的应力特征可用于分析桩-土协同作用情况,对于揭示抗滑短桩承载机理具有很大帮助。图 4 为滑坡模型在不同桩长条件下的应力分布云图。

如图 4 所示,图中显示了滑坡模型分别在无桩,桩长为 50、60、70、80 和 90 cm 时的土体应力分布情况,由图中所示的应力分布情况可以得出以下结果:

(1)如图 4(a)所示,无桩时模型的最大土应力集中于滑体前缘楔形体底部,这表明在无桩时滑体的抗滑阻力主要来自滑体前缘的阻滑段,结合模型位移图可知,依靠滑体前缘的阻滑作用不能保持滑体的稳定,在楔形体上部滑体会发生剪出破坏。

(2)设置抗滑短桩后,如图 4(b)~(f)所示,随着桩长的增加,滑体内阻滑部分明显增加,桩-土协同作用的效果较好,桩与桩周土体整体性更好,能够提供更大的阻滑力。

(3)随着桩长的增加,桩后土压力变化显著,土压力的分布更加均匀,当桩长为 50、60 和 70 cm 时,桩体受力主要集中在桩顶附近,桩长为 80 和 90 cm 时,桩体受力沿自由段均匀分布,桩体受力更加合理;其中桩长为 80 cm 时,桩体受力最小。

2.3 桩体位移分析

图 5 是不同长度的抗滑短桩在相同的试验荷载作用下桩体位移矢量图,图 5 可直观地展示桩体各部分的位移大小,位移矢量的箭头连线可以反映桩体的变形情况。

(1)从图 5 可以看出,桩体的位移沿深度近似为倒梯形分布,桩体的中上部位移基本为矩形分布,靠近滑面位置为倒三角形分布,滑面以下位移基本为零。

(2)从图 5 的位移最大值可以发现,随着桩长的增加,桩身的最大位移不断增加,且桩身位移有向下移动的趋势。

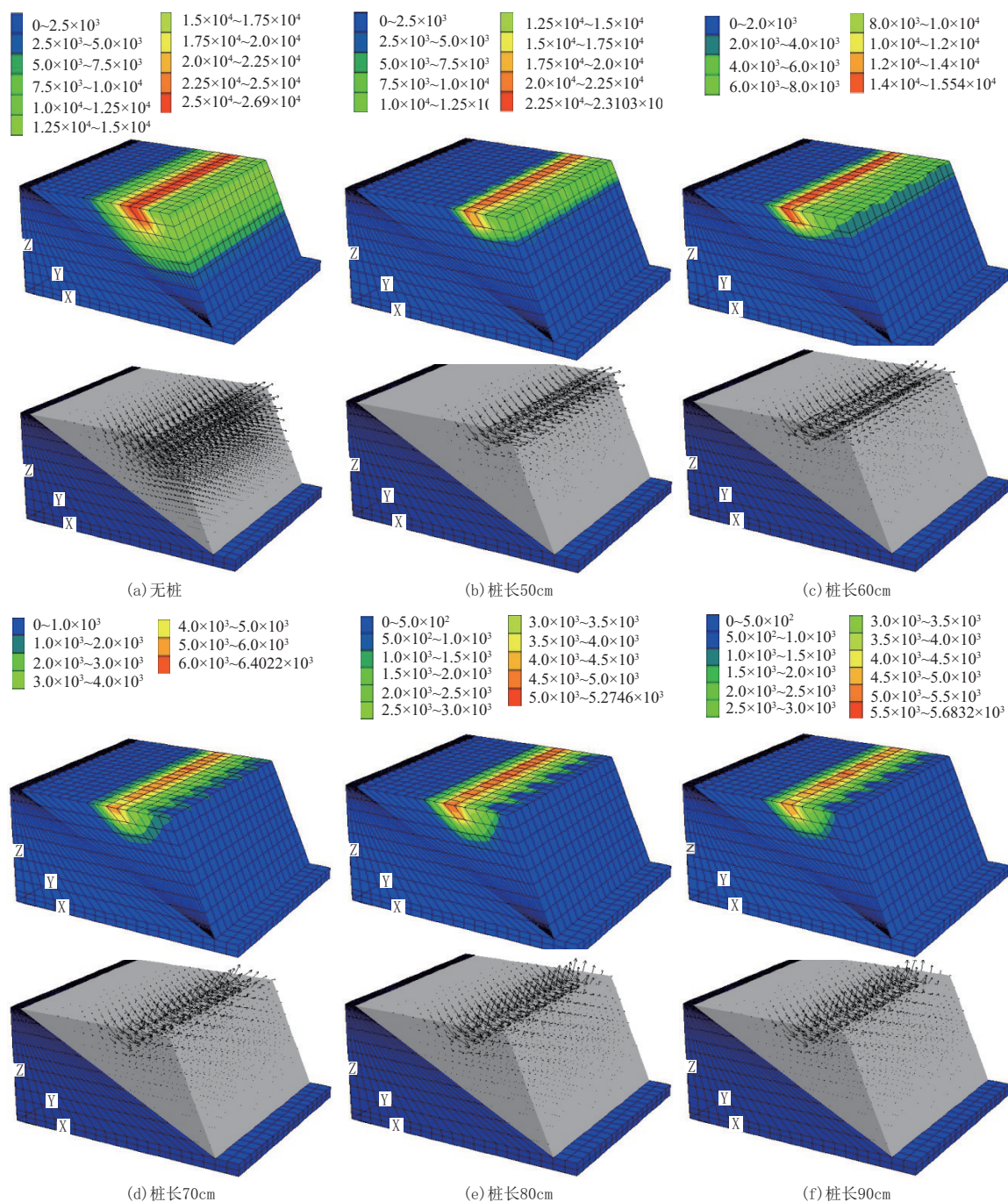


图2 不同桩长条件下滑坡模型位移云图和矢量图

Fig.2 Displacement and vector plot of the landslide with different length fo pile

2.4 桩体弯矩分析

图6是抗滑短桩在相同滑坡参数下不同桩长时的桩体弯矩变化云图,图中灰色部分表示桩体受拉,为正弯矩,黑色部分表示受压,为负弯矩。由弯矩云图可知:

(1)桩身弯矩的分布受桩长影响明显,随着桩长

的增加,桩身自由段正弯矩逐渐下移,而嵌固段负弯矩逐渐上移,并向滑面靠近。

(2)当桩长为50和60 cm时,桩顶附近并没有出现负弯矩,自由段桩身表现为受到滑坡推力作用,桩体表现为受正弯矩;当桩长分别为70、80和90 cm时,桩顶负弯矩范围逐渐增大;桩长为50、60 cm时,

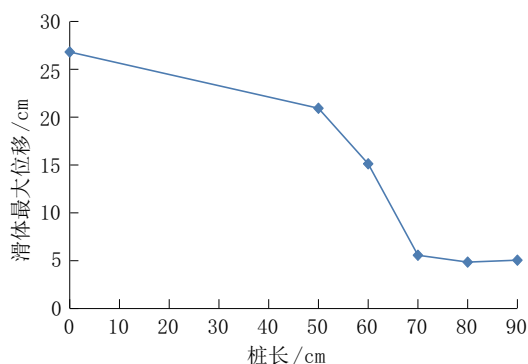


图3 滑坡模型最大位移变化

Fig.3 The maximum displacement of landslide model

桩身弯矩分布主要集中在抗滑段,桩长为70、80、90 cm时,桩身弯矩在桩体分布较为均匀,桩体处于合理受弯状态,可避免因弯矩过于集中而发生破坏。

(3) 桩体最大弯矩的变化如图7所示。图7显示,桩长的增加导致桩身最大弯矩呈逐渐增大,桩长

由50 cm增加至70 cm时,最大弯矩的幅值最大,但随着桩长的持续增加,弯矩的增加幅度逐渐降低。

3 结论

(1) 抗滑短桩可显著提高滑坡的整体稳定性,且随着桩长的增加,滑体失稳范围逐渐减小,当桩长>60 cm时,滑体处于稳定状态,表明采用抗滑短桩治理滑坡是可行的。

(2) 随着桩长的增加,桩后土压力分布趋于均匀,桩体受力情况也更为理想,其中以桩长为80 cm时,桩体受力最为理想。随着桩长的增加,桩土共同作用效果更为明显,抗滑短桩能调动更大范围的土体共同形成阻滑段,提高滑体稳定性。

(3) 桩体位移随桩长变化较为显著,桩长为50和60 cm时,桩体自由段和嵌固端分别有不同方向的位移产生,即桩体有发生转动的趋势,而当桩长>60 cm时,桩体自身稳定性较好,能够充分发挥抗滑

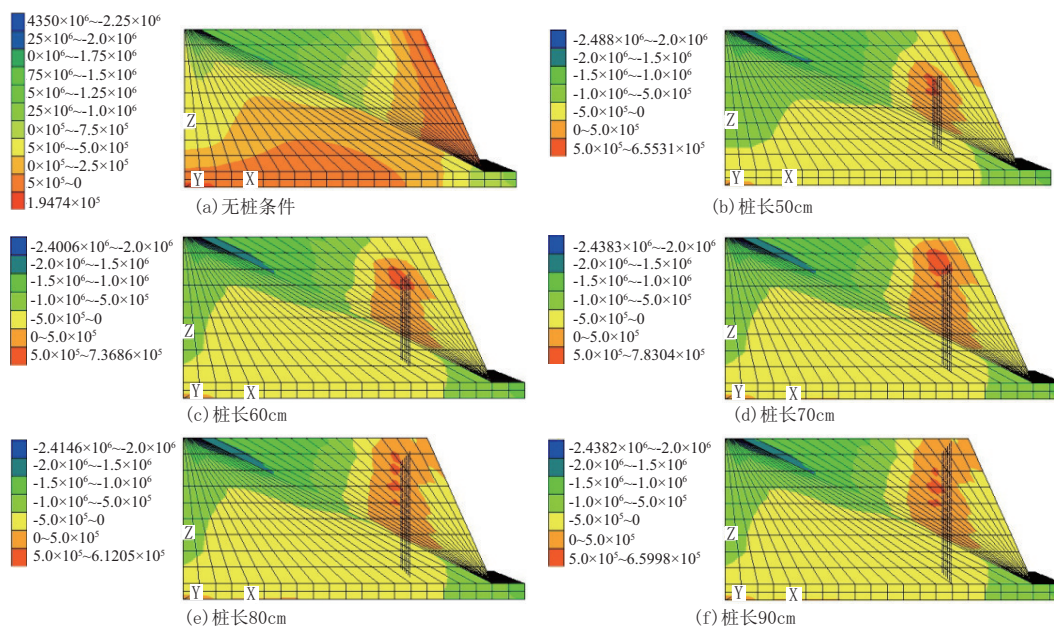


图4 滑坡土体应力分布云图

Fig.4 Soil stress distribution of the landslide

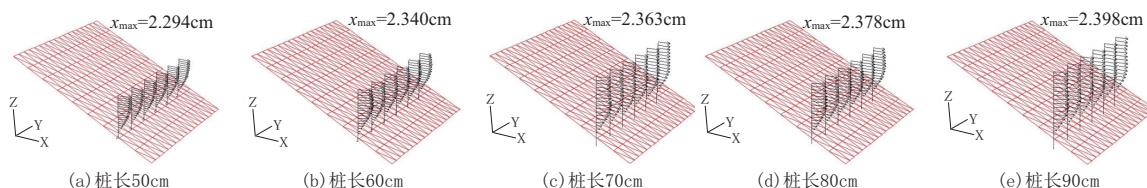


图5 桩体位移矢量图

Fig.5 Displacement vector plot of the pile

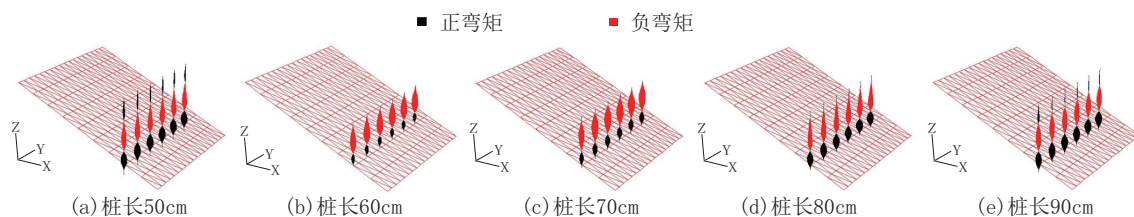


图6 桩身弯矩云图

Fig.6 Bending moment contour of the pile

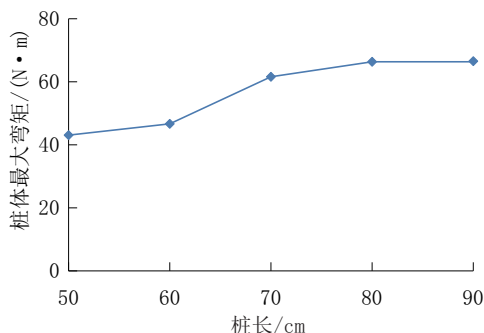


图7 桩体最大弯矩随桩长变化曲线

Fig.7 Curve of the maximum bending moment of the pile with the length of pile

性能;

当桩长为50和60cm时,桩顶附近并没有出现负弯矩,自由段桩身表现为受到滑坡推力作用,桩体表现为受正弯矩,当桩长为70、80、90cm时,桩体弯矩在桩身范围内分布较为均匀,不存在弯矩过度集中的情况,桩体受力状态明显好于桩长为50和60cm时。

(4)桩长的增加可提高滑体的稳定性,有利于形成良好的桩-土协同作用效果,发挥桩周土体的抗滑作用,但随着桩长的增加,桩体最大位移和最大弯矩均有不同程度的增大,因此在兼顾抗滑承载力和桩体合理受力的前提下,桩体自由段和滑体厚度比值为0.7~0.9时,抗滑短桩加固滑坡的效果最为理想。

参考文献(References):

- [1] 雷用,郑颖人,陈克勤.“抗滑短桩”概念及其受力影响探讨[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):608-615.
LEI Yong, ZHENG Yingren, CHEN Keqing. Inquiring the concept and loading influence of short anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 608-615.
- [2] 刘中帅.抗滑键加固渝黔高速公路顺层岩质边坡模拟研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(2):49-54.
LIU Zhongshuai. Simulation study on bedding rock slope rein-

forced by anti-slide pile in Yuqian Expressway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(2): 49-54.

- [3] 雷用,许建,郑颖人.抗滑短桩的适用条件研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(S2):1647-1651,1664.
LEI Yong, XU Jian, ZHENG Yingren. Suitable conditions analysis of short anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S2):1647-1651,1664.
- [4] 雷用,刘国政,郑颖人.抗滑短桩与土共同作用的探讨[J].后勤工程学院学报,2006,(4):17-21.
LEI Yong, LIU Guozheng, ZHENG Yingren. Discussion on interaction of short anti-sliding pile and soil[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006, (4):17-21.
- [5] 雷用,刘文平,赵尚毅.抗滑短桩越顶问题的有限元验证[J].后勤工程学院学报,2006,(3):1-4.
LEI Yong, LIU Wenping, ZHAO Shangyi. The finite element confirmation about whether the sliding face cross over the short anti-slide pile[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006, (3):1-4.
- [6] 蔡强,李乾坤,石胜伟,等.钢管抗滑短桩受力特性物理模型试验研究[J].岩土力学,2016,37(S2):679-6846.
CAI Qiang, LI Qiankun, SHI Shengwei, et al. Study of mechanical characteristics of short anti-sliding steel pipe pile by physical model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2):679-6846.
- [7] 曾红艳,刘伟,周成,等.抗滑短桩支护土坡的试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(09):119-126.
ZENG Hongyan, LIU Wei, ZHOU Cheng, et al. Experimental study on soil slope supported by short anti-sliding piles[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(9):119-126.
- [8] 曾红艳,韩利彪,周成,等.抗滑短桩加固土坡模型试验及数值分析[J].岩土工程学报,2020,42(S1):132-136.
ZENG Hongyan, HAN Libiao, ZHOU Cheng, et al. Model tests and numerical analysis of slopes reinforced by short anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1):132-136.
- [9] 李旭,龚震,周成,等.抗滑短桩锚拉竖向植筋带加固边坡的数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2022(2):124-129.
LI Xu, GONG Zhen, ZHOU Cheng, et al. Numerical simula-

- tion of soli slopes reinforced with vertical geotextile belts anchored by short anti-slide piles[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022(2):124-129.
- [10] 陈权川,陈海,李兰,等.缓倾顺层岩质边坡中抗滑键的承载性能及破坏模式研究[J].交通科技,2023(1):29-34,40.
CHEN Quanchuan, CHEN Hai, LI Lan, et al. Research on load-bearing performance and failure mode of anti-sliding bonds in gently dipping bedding rock slopes[J]. Transportation Science & Technology, 2023(1):29-34,40.
- [11] 熊斌.基于ANSYS软件的边坡开挖模拟和稳定性评价[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,(2):64-68.
XIONG Bin. Simulation of slope excavation and analysis on its stability based on ANSYS software[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,(2):64-68.
- [12] 王根,吴松,晏长根,等.不同型式抗滑桩对某滑坡治理的有限模拟分析[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(4):29-34.
WANG Gen, WU Song, YAN Changgen, et al. Different types of anti-slide piles in treatment of landslide by finite element method[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013,33(4):29-34.
- [13] 雷用,郑颖人.土质滑坡中抗滑短桩水平位移ANSYS分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(5):828-833,838.
LEI Yong, ZHENG Yingren. ANSYS analysis on horizontal deformation of short anti-sliding pile in soil landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006,2(5):828-833,838.
- [14] 杨福麟,刘永林,胡斌.武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数值模拟研究[J].工程地质学报,2013,21(1):85-91.
YANG Fulin, LIU Yonglin, HU Bin. Numerical simulation of ground subsidence due to tunnel excavation for Wuhan subway[J]. Journal of Engineering Geology, 2013,21(1):85-91.
- [15] 刘晓明,罗周全,杨彪,等.复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建[J].岩土力学,2010,31(12):4006-4010,4015.
LIU Xiaoming, LUO Zhouquan, YANG Biao, et al. Numerical modeling and geological body visualization for complex mine[J]. Rock and Mechanics, 2010,31(12):4006-4010,4015.
- [16] 胡佐平,牟锐.基于MIDAS/GTS的顺层岩质路堑边坡稳定性影响因素及影响规律分析[J].交通标准化,2010,(17):10-13.
HU Zuoping, MOU Rui. Influencing factors and rules of stability of bedding rock cutting slope based on MIDAS/GTS[J]. Communications Standardization, 2010,(17):10-13.
- [17] 朱友群,施斌,王宝军,等.边坡高填方路基下伏多层采空区稳定性数值模拟评价[J].工程地质学报,2009,17(3):394-400.
ZHU Youqun, SHI Bin, WANG Baojun, et al. Numerical simulation for stability evaluation of high backfill embankment on slope with goafs[J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(3):394-400.
- [18] 张蕊,宋传中,马还援.基坑开挖与支护FLAC数值模拟计算及分析[J].安徽地质,2007,17(1):54-59.
ZHANG Rui, SONG Chuanzhong, MA Huanyuan. FLAC calculation and analysis on excavation and support of a foundation pit[J]. Geology of Anhui, 2007,17(1):54-59.
- [19] 万保安,殷妮芳,熊茂东.基于FLAC^{3D}的边坡稳定安全系数确定[J].四川建筑科学研究,2013,39(6):135-137.
WAN Baoan, YIN Nifang, XIONG Maodong. Acquire of the slope stability factor based on FLAC^{3D} [J]. Sichuan Building Science, 2013,39(6):135-137.
- [20] 刘心庭,唐辉明.FLAC^{3D}复杂网格模型的构建及其工程应用[J].金属矿山,2010(11):108-111.
LIU Xinting, TANG Huiming. FLAC^{3D} complex grid model construction and its engineering application[J]. Metal Mine, 2010(11):108-111.
- [21] 徐能雄.适于数值模拟的三维工程地质建模方法[J].岩土工程学报,2009,31(11):1710-1716.
XU Nengxiong. 3D engineering geological modeling method suitable for numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(11):1710-1716.
- [22] 邹力,彭雄志.浅谈FLAC-3D的应用原理、优缺点及改进措施[J].四川建筑,2007,27(1):152-163,156.
ZOU Li, PENG Xiongzh. Discussion on application of FLAC-3D principles, advantages and disadvantages and improvement methods[J]. Sichuan Architecture, 2007,27(1):152-163,156.
- [23] 杨立强,张中杰,林柯,等.FLAC基本原理及其在地学中的应用[J].地学前缘,2003,10(1):24.
YANG Liqiang, ZHANG Zhongjie, LIN Ge, et al. Basic principles and its applications in geosciences of FLAC [J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(1):24.
- [24] 胡时友,蔡强,李乾坤,等.抗滑短桩加固滑坡体模型试验三维数值模拟分析[J].工程地质学报,2018,26(4):969-977.
HU Shiyou, CAI Qiang, LI Qiankun, et al. Three dimensional FEM simulation of slope reinforcement by short anti-sliding pile[J]. Journal of Engineering Geology, 2018,26(4):969-977.

(编辑 王文)