

滑坡体预应力锚索抗滑桩参数优化设计研究

李晓翠^{1,2}, 甘磊¹, 甘胜³, 曾威华³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福建 福州 350003;
3. 中国安能集团厦门分公司, 福建 厦门 361021)

摘要:依托青峪口水库上游草池滑坡体,采用有限差分法分析不同状态下的滑坡体变形和受力分布,进行预应力锚索抗滑桩参数优化设计。结果表明:桩位对滑坡体稳定性的影响较大,随着桩位与坡脚距离的增大,滑坡体安全系数先增大后减小;同一桩位下,抗滑桩锚固段存在临界长度,为30 m;抗滑桩桩距对滑坡体稳定性的影响比桩截面尺寸的影响大;在26°~35°范围内的锚索角度对滑坡体稳定性的影响较小。建议抗滑桩截面尺寸、桩距、锚索角度分别取2.5 m×3.5 m、7 m和27°。
关键词:滑坡体;预应力锚索;抗滑桩;数值模拟;青峪口水库

中图分类号:TV697.2⁺³ 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2023)04-0098-07

Study on parameter optimization design of anti-slide piles with pre-stressed anchor cable for landslide mass//LI Xiaocui^{1,2}, GAN Lei¹, GAN Sheng³, ZENG Weihua³(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited (Fujian), Fuzhou 350003, China; 3. Xiamen Branch, China Anneng Group, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the Caochi landslide mass in the upstream of the Qingyukou Reservoir, the finite difference method for parameter optimization design of anti-slide piles with pre-stressed anchor cable was used to analyze the deformation and force distribution of the landslide under different states. The results show that the pile position has a great influence on the stability of the landslide mass, and the safety factor of the landslide stability increases and then decreases with the distance between the pile position and the slope toe. Under the same pile position, there exists a critical length of the anchorage section of the anti-sliding pile, which is 30 m. The influence of the pile spacing on the stability of landslide mass is greater than the section size of anti-slide pile. In the range of 26° to 35°, the angle of anchor cable has little effect on the landslide stability. Through comprehensive analysis, it is suggested that the section size, pile spacing and anchor cable angle of the anti-slide pile should be 2.5 m×3.5 m, 7 m and 27°, respectively.

Key words: landslide mass; pre-stressed anchor cable; anti-slide pile; numerical simulation; Qingyukou Reservoir

预应力锚索抗滑桩已广泛应用于水利、交通、土木建筑等工程领域。不少学者围绕抗滑桩桩位、桩距、桩长、桩体截面尺寸和锚索角度等参数进行优化设计研究。例如:Won等^[1-3]提出抗滑桩设置在滑坡体中部附近为宜,其加固后的边坡安全系数最大;Boulfoul等^[4-5]结合边坡整体位移和岩体剪应力等,分析了不同桩长工况下抗滑桩锚固效果,指出抗滑桩锚固段存在临界长度,当锚固长度超出临界长度时,其对边坡位移和岩体剪应力的控制效果提升不明显;杨光华等^[6]开展了不同桩位下滑坡体变形试验,指出抗滑桩设置在位移最大处时的安全系数最大;冯文娟等^[7]采用有限差分法进行了抗滑桩桩位

设计,指出在滑坡体满足安全系数要求时,其最小桩身剪力对应的桩位,即为最佳桩位;易庆林等^[8]结合三峡库区边坡工程,采用有限单元法分析了降雨、库水位和桩位等组合条件下的抗滑桩锚固效果,确定了最佳桩长和桩位;朱岳明等^[9]计算了复合滑坡体3个可能滑坡面在有抗滑桩和无抗滑桩条件下的抗滑稳定性;苏国韶等^[10]研究库水位骤降条件下抗滑桩对库岸边坡稳定性的影响,给出了不同桩位条件下水深坡高比与边坡安全系数的关系曲线;陈建峰等^[11]认为桩长达到最优锚固深度后,滑动面变浅,抗滑能力降低;Li等^[12]指出增加桩长可能会引起浅层滑坡,边坡安全系数降低,建议桩间距与桩直

基金项目:国家自然科学基金项目(52179130);水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心项目(DFZX2020003)
作者简介:李晓翠(1996—),女,助理工程师,硕士,主要从事水工程安全分析和结构设计研究。E-mail:xiaocuil123@163.com
通信作者:甘磊(1987—),男,教授,博士,主要从事水工程长效运行及功能提升研究。E-mail:ganlei2015@hhu.edu.cn

径比值取 4.0;Kahyaoglu 等^[13]指出桩间距受到土拱效应和整体稳定的综合控制;Benmebarek 等^[14]指出抗滑桩间距与桩直径之比超过 4.0 时,桩间土会发生流动,抗滑桩间距与直径之比超过 12.0 时,桩土效应会消失;Akgun 等^[15]结合最大抗滑力、最短自由段长度和现场实际情况,综合确定预应力锚索的最优锚固角度;刘佳龙等^[16]指出在一定锚固角度范围内,改变锚索角度对边坡稳定性影响甚微。当前已有研究大多将模型简化为均质土坡,没有考虑工程经济指标因素,存在一定局限性。

本文依托青峪口水库上游草池滑坡体,建立其典型剖面的数值计算模型,研究滑坡体稳定性,综合滑坡体变形、稳定系数、桩身受力和工程经济性等指标,对抗滑桩位置、长度、截面尺寸、桩距和锚索角度进行优化设计。

1 工程概况

草池滑坡体位于小通江右岸草池乡斜坡地带,属中低山地貌。滑坡区西高东低,地面高程约 480~375 m(1985 国家高程基准),高差约 105 m,南北向长约 1.9 km。地形后缘拉裂槽形成平台宽 30~110 m,平台地形坡度小于 5°,中部、前缘地形坡度相对较陡,地形坡度 15°~20°,前缘岸边受冲刷局部坡度达 35°。根据地表测绘及勘探结果,滑体土厚度在 9.0~39.4 m 之间,一般厚度 15~30 m,平均厚度 21 m,滑坡体平面面积约 75 万 m²,体积约 1575 万 m³。Ⅱ区滑体物质主要为碎块石和粉质黏

土夹碎石,主要成分为砂岩,少量为泥岩,碎块石含量达 50%~60%。Ⅱ₁区块石直径一般为 1.0~2.0 m,最大直径超过 3 m,前缘岸边为孤石、块石堆积区;Ⅱ₂区块石直径一般为 0.5~2.0 m,最大直径超过 5 m,块石、孤石后缘分布较集中。滑坡区内属亚热带湿润季风气候,雨量丰沛,多年平均降水量 1 153~1 227 mm,滑坡体内地下水浸润线在滑带土之上,其典型剖面 I—I 如图 1 所示。依据 GB/T 38509—2020《滑坡防治设计规范》,考虑滑坡灾害造成的潜在经济损失和威胁对象等因素,确定草池滑坡体防治等级为Ⅲ级。

2 计算模型

本文采用 ANSYS 软件进行前处理建模,借助 ANSYS-FLAC3D 接口程序,将计算模型导入 FLAC3D 软件,开展有限差分数值计算。滑坡体三维计算模型如图 2 所示,模型长 417.30 m,宽 24.0 m,包含 108 442 个单元,113 846 个节点。

计算模型岩土体材料参数主要依据地质勘探资料 and 类似工程经验,具体参数见表 1。依据 GB/T 38509—2020《滑坡防治设计规范》,设计状态和校核状态下Ⅲ级滑坡体抗滑稳定设计安全系数分别为 1.20 和 1.15,初步拟定桩位在滑坡前缘距离 $x=65.45$ m 处,桩长 30 m,桩距 6 m,桩截面尺寸 2.0 m×3.0 m,桩底支承条件采用铰支端,锚索采用 14 根直径为 15.2 mm 的钢绞线,其极限抗拉力为 3 645.6 kN,锚索角度为 30°,锚孔直径为 135 mm。

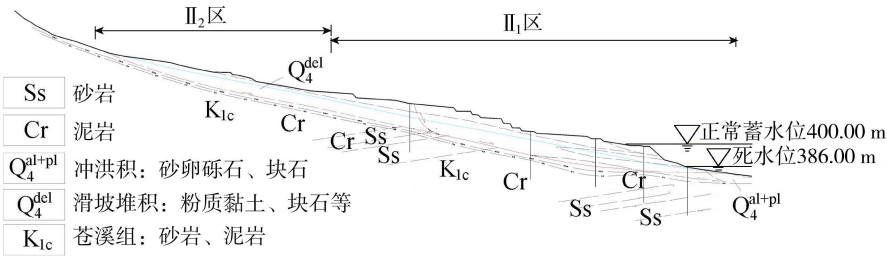


图 1 草池滑坡体典型剖面 I—I

表 1 岩土体计算参数

岩土体	容重/(kN/m ³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		弹性模量/MPa		泊松比		抗拉强度/MPa
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	
人工填土	19.5	20.5	8	4	30	28	25	23	0.31	0.32	0
碎块石土	20.5	21.0	10	8	25	21	36	32	0.30	0.31	0
粉质黏土夹碎石	20.2	21.3	22	20	18	14	30	25	0.30	0.31	0
滑带土	20.3	20.6	25	17.9	17.5	12.5	20	18	0.32	0.35	0
强风化泥岩	23.5	22.6		100		19		0.5		0.35	0.20
弱风化泥岩	24.0	24.1		300		22		1.5		0.32	0.40
微风化泥岩	25.2	25.3		500		31		2.9		0.31	0.88
强风化砂岩	24.0	24.1		150		21		2.0		0.31	1.80
弱风化砂岩	24.3	24.5		700		39		10		0.30	2.00
微风化砂岩	24.8	25.0		1 100		50		13		0.27	2.84

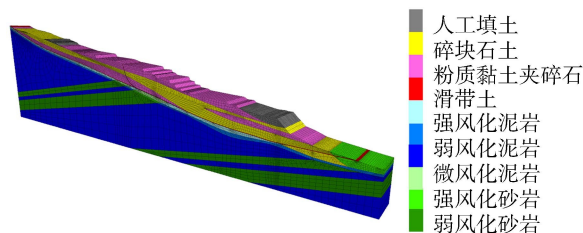


图2 草池滑坡体 I—I 剖面计算模型

抗滑桩和预应力锚索分别采用 FLAC3D 软件的 pile 和 cable 结构单元进行模拟,其中,抗滑桩密度 2500 kg/m^3 ,弹性模量 30 GPa ,泊松比 0.167 ,切向耦合单位长度上的弹簧刚度 k_s 和黏聚力 c_s 为 266 GPa 和 88 GN/m ,法向耦合弹簧单位长度上的刚度 k_n 和黏聚力 c_n 为 266 GPa 和 88 GN/m ,切向耦合弹簧内摩擦角 φ_s 和法向耦合弹簧内摩擦角 φ_n 均为 25° ;预应力锚索总长 45 m ,锚固段长度 8 m ,弹性模量 200 GPa ,预应力 2000 kN ,抗拉强度 1860 MPa ,截面面积 19.6 cm^2 ,锚孔直径 135 mm ,水泥浆单位长度上黏结力 c_g 为 118 GN/m ,水泥浆单位长度上的剪切刚度 k_g 为 40.2 GPa ,水泥浆摩擦角 φ_g 为 25° ,锚索自由段 c_g 、 k_g 、 φ_g 均为 0 。岩土体采用摩尔-库仑塑性模型,底部为固定约束,四周为法向约束。计算初始地应力场时,考虑天然地下水位和天然状态下的外水压力,采用弹性求解方法^[17]生成初始地应力场。

3 结果与分析

3.1 稳定性分析

考虑天然状态、正常蓄水状态和正常蓄水暴雨状态下滑坡体应力边界条件、土体重度和抗剪强度

等均发生变化,稳定性状态主要依据 GB/T 32864—2016《滑坡防治工程勘查规范》进行判别。其中正常蓄水暴雨状态按最不利情况考虑,假定滑坡体安全饱和,草池滑坡体变形情况如图 3 和图 4 所示。滑坡体安全系数采用 FLAC3D 软件自带的强度折减法程序模块进行计算,结果表明:天然状态下滑坡体最大变形为 96.63 mm ,安全系数为 1.12 ,处于基本稳定状态;正常蓄水状态下滑坡体最大累计变形为 104.52 mm ,安全系数为 1.21 ,处于稳定状态;正常蓄水暴雨状态下,安全系数为 0.94 ,位移发生突变,处于不稳定状态。由剪切应变增量变化可知,滑坡体主要沿着 II₁ 区古滑带发生推移式破坏,且最危险区域为 II₁ 区中后缘,而坡体前缘主要发生牵引式破坏,即草池滑坡为复合式滑坡。

3.2 桩位确定

抗滑桩加固位置对其抗滑效果影响较大。草池滑坡体内地下水位较高,前缘库水位在不同状态下发生变化,地质条件复杂。本文考虑边坡地形和轴向长度,选取 9 个布桩位置进行抗滑桩桩位研究,具体桩位如图 5 所示。各状态下不同桩位处抗滑桩发挥作用大小有所差异。以二分法为基本理论,自编 FISH 语言计算滑坡体加固后的安全系数,得到单一抗滑桩作用下不同桩位安全系数情况,如图 6 所示。由图 6 可知,天然水位和正常蓄水位状态下,随着桩位与 $x = 0 \text{ m}$ 的轴向距离增大,安全系数先增大后减小;正常蓄水暴雨状态下,桩位与其对应安全系数关系曲线为抛物线,在桩位 6 ($x = 151.59 \text{ m}$) 处安全系数最大。桩位首先应满足安全系数要求^[18],由图 6 可知,桩位 5~7 这 3 个桩位方案的滑坡体安全系数满足规范要求。

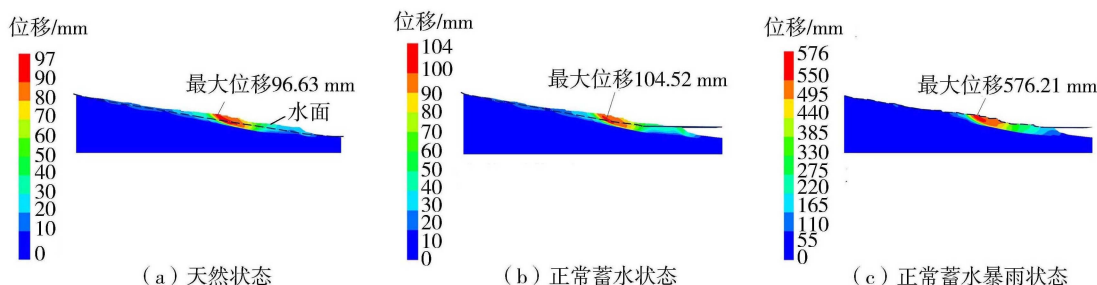


图3 加固前 I—I 剖面滑坡体位移分布

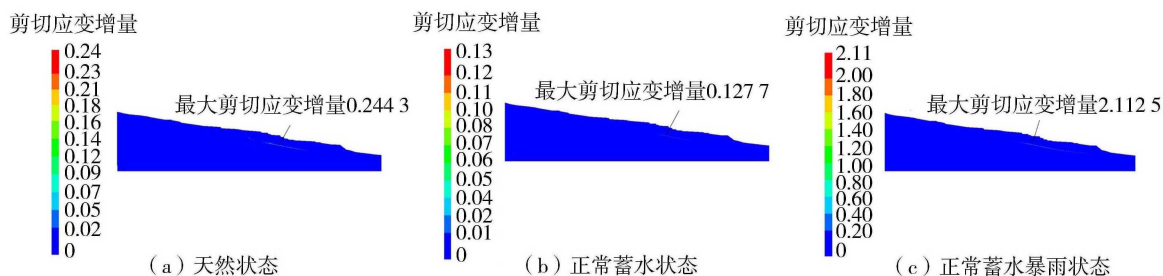


图4 加固前 I—I 剖面滑坡体剪切应变增量分布

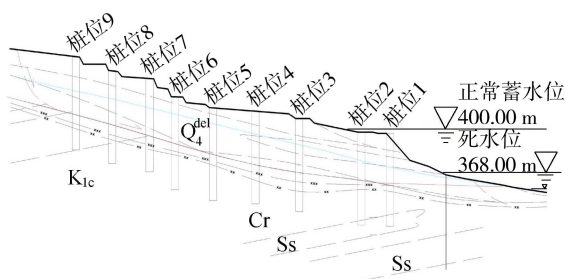


图5 桩位布置

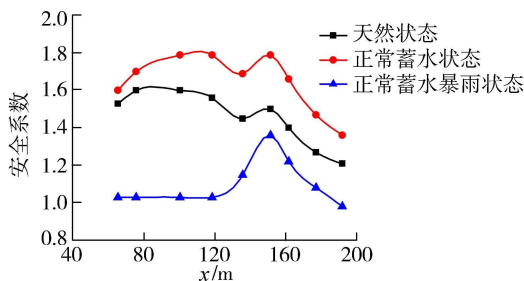


图6 不同桩位安全系数

各桩位下抗滑桩受力情况如图7和图8所示。根据桩身受力,按剪力和最小且安全系数满足要求为准则,确定最佳桩位^[13]。由图8可知,桩位6和7均比桩位5的剪力和小,故桩位6或桩位7作为抗滑桩加固位置较为合适。此外,桩位6处,滑坡体天然状态、正常蓄水状态和正常蓄水暴雨状态下最大位移分别为47.30、48.90、202.3 mm;桩位7处,3种状态下滑坡体对应的最大位移分别为45.50、45.40、276.20 mm。综合考虑各状态下滑坡体安全系数、变形和桩身受力情况,最终选取桩位6作为抗滑桩加固位置。

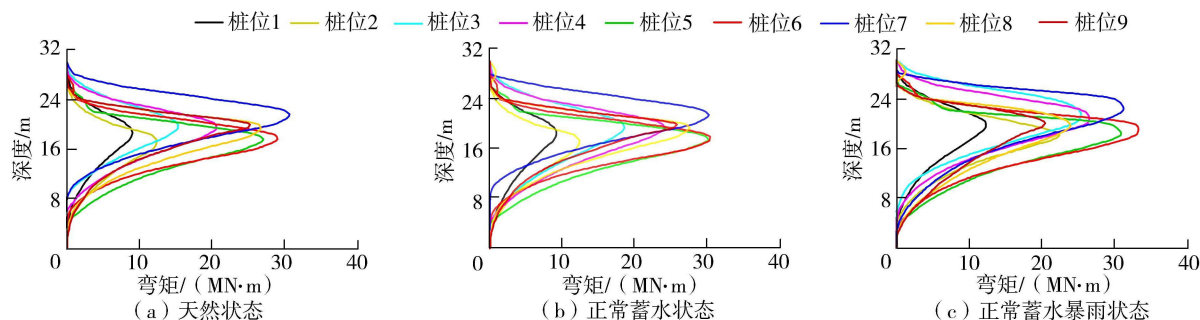


图7 不同桩位下抗滑桩弯矩分布

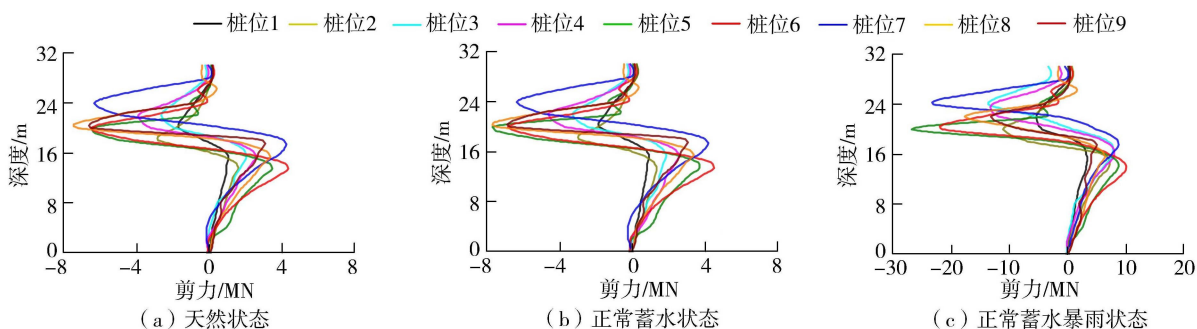


图8 不同桩位下抗滑桩剪力分布

3.3 桩长优化

通过分析不同桩长的滑坡体稳定性及桩体受力情况,确定最优锚固长度。锚固段(滑床以下部分)宜为桩长 L 的 $1/3 \sim 2/5$,桩位6处抗滑桩自由段长18.5 m,故桩长要大于28 m,本文拟定5组桩长进行正交试验,求出不同桩长下滑坡体安全系数(表2)。由表2可知,桩位6处,抗滑桩长度达到30 m后,其滑坡体安全系数不再增加,一定桩长范围内,抗滑桩长度对稳定系数影响较小。不同桩长抗滑桩受力如图9和图10所示。由图可知,桩长达到30 m后,进一步增大桩长,其桩身剪力和弯矩变化很小。不同桩长状态下,桩体所受弯矩相近,桩身剪力差异较大,即抗滑桩与土体之间发生错动变形的程度明显不同。桩长为30 m时,正常蓄水暴雨状态下桩身所受剪力与正常蓄水状态相差较小,故确定抗滑桩最佳桩长为30 m。

表2 各桩长下抗滑桩安全系数

状态	安全系数				
	$L=28\text{ m}$	$L=29\text{ m}$	$L=30\text{ m}$	$L=31\text{ m}$	$L=32\text{ m}$
天然	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
正常蓄水	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79
正常蓄水暴雨	1.35	1.36	1.36	1.36	1.36

3.4 桩截面尺寸和桩距优化

本文抗滑桩截面尺寸选定 $1.5\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 、 $2.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 和 $2.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$,桩距选择6 m、7 m和8 m,模型宽度选取4倍桩距,预应力锚索设置在离桩顶1 m处,锚索允许拉力为2370 kN。不同桩截面尺寸和桩距条件下滑坡体应力、变形和稳定计算结果见表3。

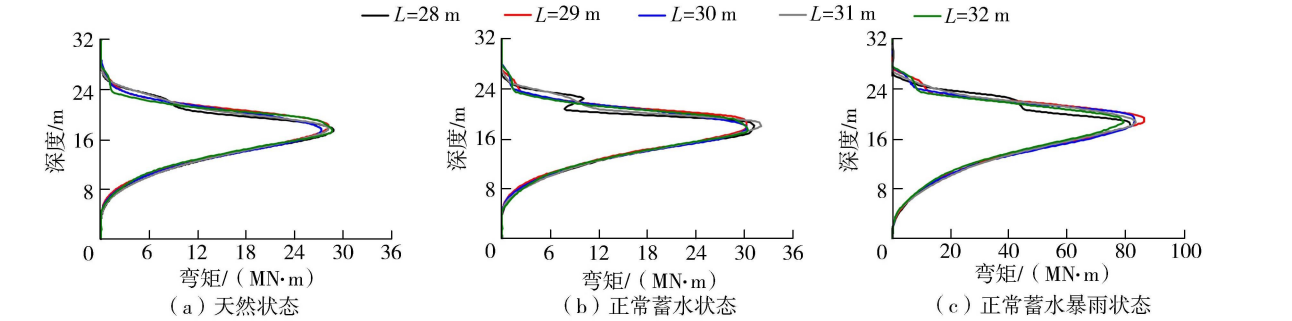


图9 不同桩长下抗滑桩弯矩

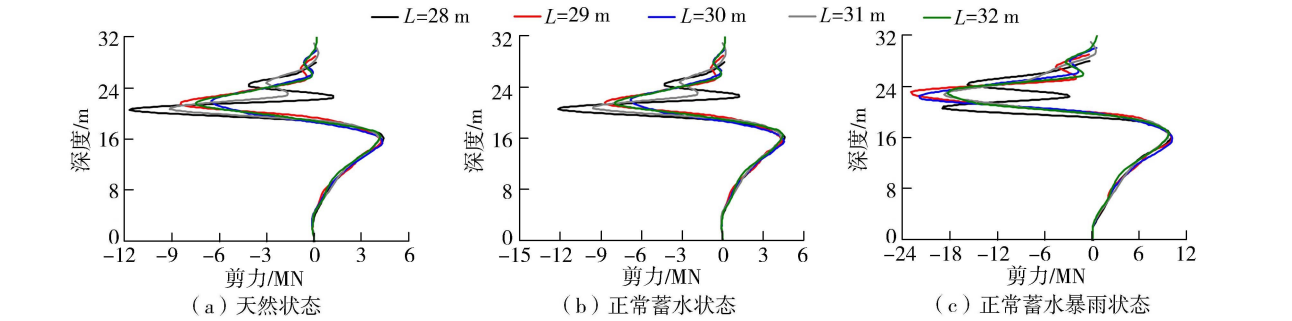


图10 不同桩长下抗滑桩剪力

表3 不同桩截面尺寸和桩距条件下计算结果

桩距/m	桩截面尺寸/m		正常蓄水暴雨 状态安全系数	土体累计最 大变形/cm	桩顶最大 变形/cm	最大弯 矩/(kN·m)	最大剪 力/kN	锚索轴 力/kN
	宽度	长度						
6	1.5	2.0	1.29	25.00	11.79	33 789	6 685	2 969
	2.0	3.0	1.29	19.67	6.45	56 142	8 073	2 521
	2.5	3.5	1.29	18.47	4.42	66 073	8 612	2 356
7	1.5	2.0	1.18	27.83	12.20	33 467	6 269	3 003
	2.0	3.0	1.18	23.63	6.00	51 484	7 317	2 486
	2.5	3.5	1.18	22.62	3.92	60 037	7 767	2 316
8	1.5	2.0	1.11	36.05	12.48	31 809	6 270	3 034
	2.0	3.0	1.11	33.03	6.84	55 728	7 636	2 558
	2.5	3.5	1.11	32.14	4.41	63 136	8 004	2 359

由表3可知,在桩位、桩长等参数相同的情况下,在一定范围内,抗滑桩截面尺寸对滑坡体稳定性的影响较小,桩距对滑坡体稳定性的影响显著。滑坡体安全系数、桩锚协调变形、锚索轴力均符合要求的抗滑桩截面尺寸为2.5 m×3.5 m,桩距为6 m或7 m,故结合工程经济性进一步确定最佳桩距。按照GB/T 38509—2020《滑坡防治设计规范》进行配筋计算,抗滑桩截面尺寸为2.5 m×3.5 m时,桩截面弯矩不超过4 822 kN·m处可不配置钢筋,纵筋采用直径为32 mm的HRB400热轧带肋钢筋,箍筋采用直径为12 mm的HRB400热轧带肋钢筋,间距为350 mm,其横向加固范围为如图1所示的Ⅱ₁区区域,纵向加固范围为沿小通江流动方向延长393 m,抗滑桩造价按当地混凝土和钢筋价格进行计算,C30混凝土约为595元/m³,直径32 mm和12 mm的HRB400热轧带肋钢筋约为5 100元/t,不考虑人工开挖等成本,计算得到桩距6 m和7 m时,抗滑桩造价分别为1 349.10万元和1 104.43万元,桩距7 m时节省18.14%的工程

造价。综合考虑,选定桩截面尺寸为2.5 m×3.5 m,桩距为7 m。

3.5 锚索角度优化

本文选择26°~35°共10种锚索角度进行分析,计算表明,锚索角度对锚索轴力、抗滑桩桩顶变形、滑坡体稳定系数和变形等参数影响很小,锚索角度为27°时滑坡体桩顶变形、桩身最大弯矩和最大剪力均最小,抗滑桩受力情况如图11所示。由图11可知,锚索角度在26°~35°范围内变化,桩身受力相差不大。其中,锚索角度为27°时,锚索轴力在允许的轴力范围内,且工程造价最低,抗滑桩造价降低约6.24万元。正常蓄水暴雨状态下滑坡体最大位移和剪切应变增量明显大于其天然状态和正常蓄水状态下的计算值,整体沿Ⅱ₁区古滑带发生滑移,正常蓄水暴雨状态对滑坡体稳定性不利。图12和图13为加固后I—I剖面滑坡体变形情况。对比图3、图4和图12、图13可知,采用优化的预应力锚索抗滑桩设计方案加固草池滑坡体后,滑坡体最大位移和剪切

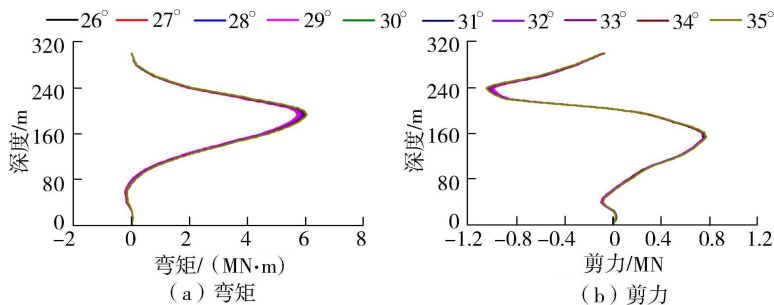


图 11 不同锚索角度正常蓄水状态桩身受力分布

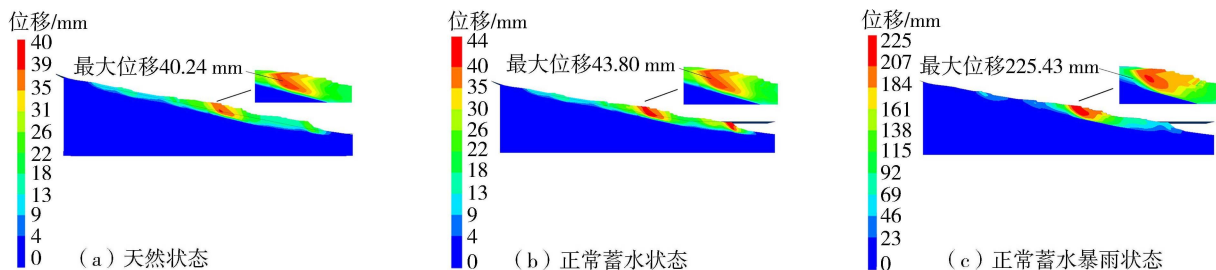


图 12 加固后 I—I 剖面滑坡体位移分布

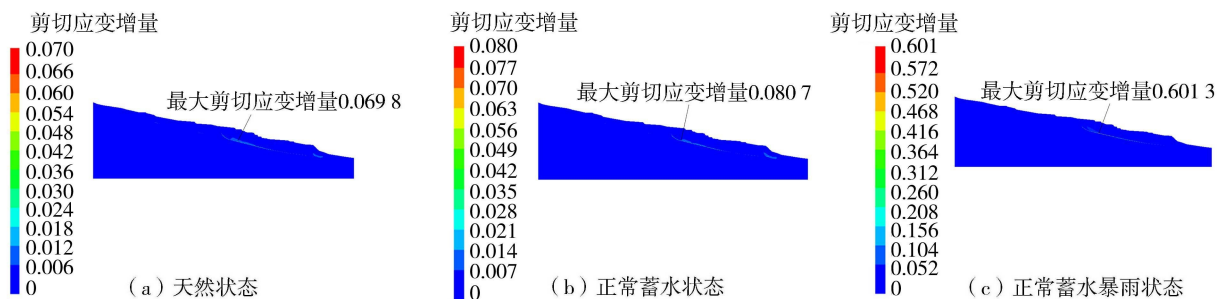


图 13 加固后 I—I 剖面滑坡体剪切应变增量分布

应变增量显著减小,较加固前滑坡体最大位移减小了 58.1%~60.8%,剪切应变增量降低了 36.8%~71.5%,加固效果显著。

4 结 论

- 草池滑坡体为复合式滑坡,其稳定性受地下水位影响较大,抗滑桩加固位置对抗滑效果影响较大,随着抗滑桩位置与坡脚的距离增大,滑坡体安全系数先增大后减小,选取 $x=151.59\text{ m}$ 处为最佳桩位。
- 桩长应保证一定的嵌固深度,但桩长对滑坡体稳定性影响较小,抗滑桩锚固段存在临界长度,超过 30 m 后,增加锚固长度对桩体弯矩和剪力影响较小。
- 各预应力锚索抗滑桩参数中,桩距对滑坡体稳定性的影响大于抗滑桩截面尺寸的影响,最优桩截面尺寸为 $2.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}$,最优桩距为 7 m。
- 锚索角度在 $26^\circ\sim 35^\circ$ 范围内变化,桩身受力相差不大,锚索角度对滑坡体稳定性影响甚微。锚索角度为 27° 时,锚索轴力在允许范围内,且工程造价最低。

参考文献:

[1] WON J, YOU K, JEONG S, et al. Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(4): 304-315.

[2] LIN H, SUN S W. Influence of pile position and length on stress deformation behaviors of layered rock mass slope[J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 422-426.

[3] 陈冲,王卫,吕华永. 基于复合抗滑桩模型加固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3207-3217. (CHEN Chong, WANG Wei, LYU Huayong. Stability analysis of slope reinforced with composite anti-slide pile model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3207-3217. (in Chinese))

[4] BOULFOUL K, HAMMOUD F, ABBECHE K. Numerical study on the optimal position of a pile for stabilization purpose of a slope[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 21(5): 401-411.

[5] SHOOSH PASHA I, AMIRDEHI H A. Evaluating the stability of slope reinforced with one row of free head piles[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 2131-2141.

[6] 杨光华,张有祥,张玉成,等. 基于边坡变形场的抗滑桩最优加固位置探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 8-13. (YANG Guanghua, ZHANG Youxiang, ZHANG Yucheng, et al. Optimal site of anti-landslide piles based on deformation field of slopes[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Sup1): 8-13. (in Chinese))
- [7] 冯文娟, 琚晓冬. 基于 FLAC^{3D} 的抗滑桩设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (增刊 2): 256-259. (FENG Wenjuan, JU Xiaodong. Design method for anti-slide piles based on FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Sup2): 256-259. (in Chinese))
- [8] 易庆林, 周瑞, 梁卫, 等. 三峡库区三门洞滑坡稳定分析及抗滑桩模拟研究[J]. 人民长江, 2021, 52 (11): 111-116. (YI Qinglin, ZHOU Rui, LIANG Wei, et al. Stability study on Sanmendong landslide in Three Gorges Reservoir area and simulation of anti-slide pile [J]. Yangtze River, 2021, 52 (11): 111-116. (in Chinese))
- [9] 朱岳明, 孙统立, 吴健. 安康水电站尾水边坡 2 号复合滑坡体稳定分析[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (4): 8-11. (ZHU Yueming, SUN Tongli, WU Jian. Stability analysis of No. 2 compound landslide on the right tailwater bank of Ankang Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24 (4): 8-11. (in Chinese))
- [10] 苏国韶, 燕柳斌, 丁雷, 等. 库水位骤降条件下涉水边坡抗滑桩加固效果[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (4): 22-26. (SU Guoshao, YAN Liubin, DING Lei, et al. Research on reinforcement effect of anti-slide pile at riverside slope under water level plummeting condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (4): 22-26. (in Chinese))
- [11] 陈建峰, 郭小鹏, 田丹, 等. 抗滑桩锚固长度对均质边坡滑动面及抗滑能力影响研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50 (1): 42-49. (CHEN Jianfeng, GUO Xiaopeng, TIAN Dan, et al. Effect of Anti-slide piles anchorage lengths on slip surface and anti-slide capacity of homogeneous slope [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50 (1): 42-49. (in Chinese))
- [12] LI Hao, DU Qinwen. Stabilizing a post-landslide loess slope with anti-slide piles in Yan'an, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80 (22): 739.
- [13] KAHYAOGU M R, IMANÇLI G, ÖNAL O, et al. Numerical analyses of piles subjected to lateral soil movement [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16 (4): 562-570.
- [14] BENMEBAREK M A, BENMEBAREK S, RAD M M, et al. Pile optimization in slope stabilization by 2D and 3D numerical analyses [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 16 (2): 211-224.
- [15] AKGUN H, KOÇKAR M K. Design of anchorage and assessment of the stability of openings in silty, sandy limestone: a case study in Turkey [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (1): 37-49.
- [16] 刘佳龙, 贺雷, 冯自霞, 等. 岩质高挖方边坡锚杆参数优化设计研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (增刊 2): 375-380. (LIU Jialong, HE Lei, FENG Zixia, et al. Parameter optimization design of anchors in high cutting rock slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (Sup2): 375-380. (in Chinese))
- [17] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [18] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 27 (6): 950-954. (LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Analysis of pile location on landslide control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (6): 950-954. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-05-30 编辑: 俞云利)

(上接第 91 页)

- [14] 李冬雪, 杨康, 何兆益, 等. 混凝土中的声发射波速特性及其在源定位中的应用[J]. 应用声学, 2021, 40 (3): 400-406. (LI Dongxue, YANG Kang, HE Zhaoyi, et al. Acoustic emission wave velocity character in concrete and its application in source localization [J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40 (3): 400-406. (in Chinese))
- [15] LI Dongxue, YANG Kang, HE Zhaoyi, et al. Acoustic emission wave velocity attenuation of concrete and its application in crack localization [J]. Sustainability, 2022, 12 (18): 7405.
- [16] 黄逸群, 孙岳阳, 王洋, 等. 混凝土声发射信号源定位精度的细观模型计算分析[J]. 应用声学, 2022, 41 (6): 982-989. (HUANG Yiqun, SUN Yueyang, WANG Yang, et al. Analysis of the acoustic emission source positioning accuracy based on concrete mesostructure model [J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41 (6): 982-989. (in Chinese))
- [17] KALYANI D, PRADEEP S, SRIVANI P. Secured information sharing in SCM: parametric analysis on improved beetle swarm optimization [J]. Procedia Computer Science, 2022, 215: 897-908.
- [18] 张庆. 基于改进型混沌映射的粒子群算法及其在天线参数优化中的应用[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [19] 蒋莹莹, 田娜, 纪志成. 基于改进竞争粒子群算法的DFIG 参数辨识[J]. 控制工程, 2018, 25 (1): 122-130. (JIANG Yingying, TIAN Na, JI Zhicheng, et al. Improved competitive particle swarm optimization for parameter identification of DFIG [J]. Control Engineering of China, 2018, 25 (1): 122-130. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-08-09 编辑: 刘晓艳)