

· 地基与基础 ·



# 加筋高填方区码头桩基应力影响因素分析\*

左良栋<sup>1</sup>, 周世良<sup>2</sup>, 泉金<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

**摘要:** 随着内河山区水库库区港口建设朝着大型化方向不断发展, 为获取更大的陆域空间, 需要进行加筋高填方施工, 前沿作业平台的码头桩基与加筋填方区土体的相互作用成为影响码头结构安全的重要因素。以三峡库区某架空直立式码头为例, 通过室内模型试验, 探讨加筋高填方区桩后土拱效应的规律, 证明加筋效应对改善和提升桩基受力是有益的。运用有限元分析方法, 将筋带布置方式、填方区坡度和土体物理力学参数等因素对土拱效应和桩基应力的影响进行对比分析, 并对优化加筋高填方区桩基设计提出建议。

**关键词:** 加筋填方区; 室内模型试验; 土拱效应; 桩基应力

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0170-08

## Influential factors of pile foundation stress of wharf in reinforced high fill area

ZUO Liang-dong<sup>1</sup>, ZHOU Shi-liang<sup>2</sup>, QUAN Jin<sup>1</sup>

(1. Hohai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

**Abstract:** With the development of large-scale reservoir port construction in inland mountainous areas, it is necessary to carry out reinforced high fill construction to obtain more land space. The interaction between wharf pile foundation of frontier operation platform and soil in reinforced fill area has become an important factor affecting wharf structural safety. Taking an overhead vertical wharf in the Three Gorges Reservoir area as an example, we discuss the law of soil arching effect behind piles in reinforced high fill area through indoor model test, and it is proved that the reinforcement effect is beneficial to improve and enhance the stress of pile foundation. By the finite element analysis method, the influences of reinforcement arrangement, slope of fill area and physical and mechanical parameters of soil on soil arching effect and pile foundation stress are systematically compared and analyzed, and suggestions are put forward for optimizing the design of pile foundation in reinforced high fill area.

**Keywords:** reinforced fill area; indoor model test; soil arching effect; pile foundation stress

随着长江经济带发展战略的深入实施, 流域各省市的水运经济得到快速发展, 港口、航道等基础设施建设步伐加快<sup>[1]</sup>。在山区河流上建设码头, 陆域空间狭小是个突出问题<sup>[2]</sup>。为破解这个难题, 大都通过回填造陆的方式来获得一定的堆场面积, 并在高填方区沉降控制方面采取加筋土

的方式进行处理。在顶部堆载等因素的影响下, 堆场填方土体会发生沉降变形, 对前沿的桩基产生横向的推力和竖向的负摩擦力<sup>[3]</sup>。因此, 此类桩基具有被动桩的典型特征, 其受力更为复杂。

对于被动桩的研究起步于抗滑桩领域。国内外学者从不同角度做了大量工作: 1) 围绕滑坡体的稳

收稿日期: 2021-09-09

\*基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800739); 重庆市交通行业科学技术项目(2020-JTK-066); 重庆市技术创新与应用示范(社会民生类)一般项目(cstc2018jscx-msybX0274)

作者简介: 左良栋(1984—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为水工建筑物损伤及结构与地基相互作用。

定性及影响因素进行探讨, 包括不同土质<sup>[4-6]</sup>、内部结构<sup>[7]</sup>、水因素影响<sup>[8]</sup>、土体蠕变<sup>[9]</sup>等多重因素, 此类工作为探究抗滑桩的受力机理奠定了基础; 2) 以抗滑桩为研究对象, 探讨桩基的尺寸<sup>[10]</sup>、桩间距<sup>[11]</sup>、布置方式<sup>[12]</sup>、截面形状<sup>[13]</sup>等因素对桩基工作性能和加固效果的影响, 并进行设计方法的研究; 3) 围绕桩土相互作用展开研究, 主要从相互作用机理、计算方法、实验分析等不同角度开展相关工作<sup>[14-17]</sup>。在码头桩基与岸坡相互作用方面, 国内较早的报道是魏汝龙等<sup>[18]</sup>开展的试验和计算研究。由于近年来高填方区多数采取加筋土技术<sup>[19]</sup>, 进一步增加了问题的复杂性和研究的难度, 导致许多新的研究课题的出现。

本文拟通过室内模型试验, 开展加筋填方区桩后土拱效应和桩基应力的规律研究。运用有限元计算方法, 对加筋方式、填方区坡度和填方区土体物理力学参数等因素对桩后土拱效应和桩基应力的影响进行计算, 将模型试验结果和数值计算分析对比, 得到桩基应力的分布规律, 并提出加筋高填方区桩基优化设计的建议。

### 1 室内模型试验

根据内河加筋高填方区码头桩基受力特点, 即由于后方陆域堆载等竖向荷载的作用, 边坡土体发生水平向位移, 同时由于桩间土拱效应主要表现为水平方向, 对模型边坡顶部施加竖向堆载, 以模拟码头桩基的实际工作状态。

#### 1.1 模型试验设计

试验模型池的平面尺寸为 6.0 m×3.0 m×1.5 m (长×宽×深), 池壁采用厚度为 240 mm 的黏土砖砂浆砌筑而成, 池底采用 120 mm 素混凝土找平(图 1)。



图 1 模型试验池

本试验模为直径 125 mm、长 1.9 m 的钢筋混凝土圆形截面桩, 为测试水平荷载作用下填方区段桩

身曲率变化, 应变片沿桩长方向对称布置 2 排, 应变片间距为 150 mm, 应变片的数量为 11 对, 其中填方区段 7 对, 嵌岩段 3 对, 分界处 1 对(图 2)。

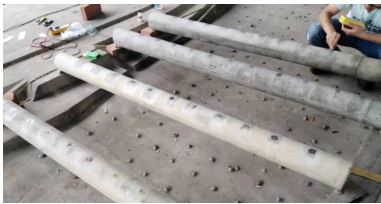


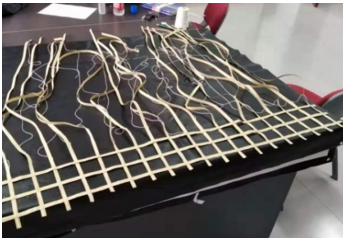
图 2 制作中的模型桩

三峡库区码头建设区域的填料主要是就地取材, 内部多包含有黏性土、砂性土和块石。为模拟工程实际情况, 试验选择 3 种不同性质的填料作为加筋陡坡的原材料(表 1), 开展桩土相互作用试验研究。

表 1 边坡填料配比及物理力学参数

质量配比 (黏性土:石粉:碎石)	密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	含水率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
1:5:4	1.73	16.5	13	28
1.5:5.5:3	1.71	17.5	17	27
2:6:2	1.70	18.5	18	25

模型筋带的参数设置为: 宽度  $d=3.0\text{ mm}$ ; 极限抗拉强度  $T_u=5.0\text{ kN/m}$ 。根据以上参数, 选择以 100 g 牛皮纸和 1 mm 棉线为原料, 粘制双向模型土工格栅。以宽度为 3.0 mm 的 100 g 牛皮纸为模型筋带表层, 其上均匀布置 1 条 1 mm 棉线作为筋带纤维, 2 层牛皮纸表层之间用液体胶水粘接, 放置阴凉处晾干后使用(图 3)。



a) 制作过程



b) 成品

图 3 模型筋带制作

根据填料的不同配比，预先在试验场地外进行填料的拌合，而后按照分层填筑压实的方式进行填筑。每层填筑的厚度为 200 mm，填料压实后铺设 1 层筋带，逐层填筑至设计高度，坡体外部的筋带按照设计的坡度进行刷坡后反包压实(图 4)。



a) 填料拌合



b) 填筑



c) 铺设筋带



d) 压实

图 4 模型加筋边坡填筑过程

采用装满砂土石块的编织袋在坡体上方进行堆载，每层 20 袋，堆置 4 层，转化为作用于坡体上部的均布荷载为 10.7 kPa。为模拟堆载的时间效应，4 层堆载间隔 24 h 分级完成，全部堆放完成后静置 168 h 后开始数据采集(图 5)。



a) 堆载

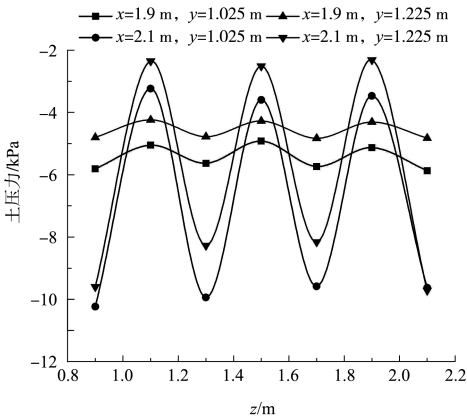


b) 数据采集

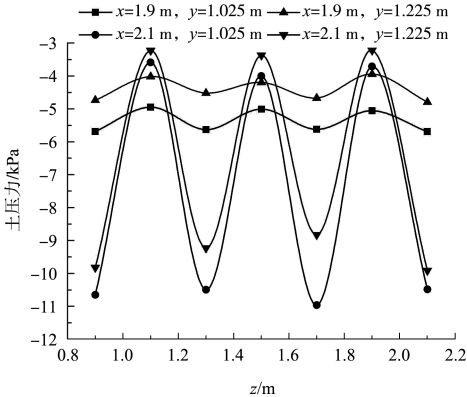
图 5 堆载及数据采集过程

1.2 试验数据及结果分析

桩后土压力的采集使用直径为 108 mm 的振弦式土压力计，共布设 2 排、14 个测点，分别采集加筋密度为 4 层和 8 层的桩后土压力(图 6)。



a) 4层加筋



b) 8层加筋

图 6 不同加筋密度的桩后土压力

对比 2 种工况下桩后土压力曲线可见, 2 组数据曲线的变化趋势基本一致: 水平向和竖向土压力均呈现近桩增大、远桩减小的趋势。在相同位置, 8 层加筋土体内土压力较大, 这是由于加筋效应提高了土体强度、限制了土体的变形所致。由于桩基的存在限制了土体向前位移, 从而以桩基为拱脚, 形成桩后土拱, 导致桩后土压力大于桩间土压力。随着加筋数量的增加, 桩后土压力减小, 这是由于加筋体提高了土体强度, 减少了土体的沉降变形。

弯矩是桩基设计的重要参数。根据试验方案, 4 根桩基的桩后土压力呈对称分布, 因此选择其中的 2 根桩身弯矩(1 号和 2 号), 绘制弯矩曲线(图 7)。

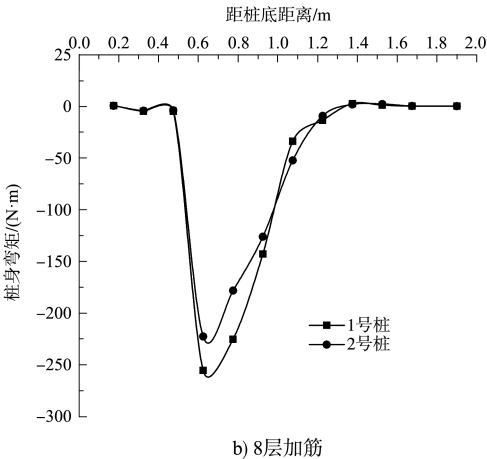
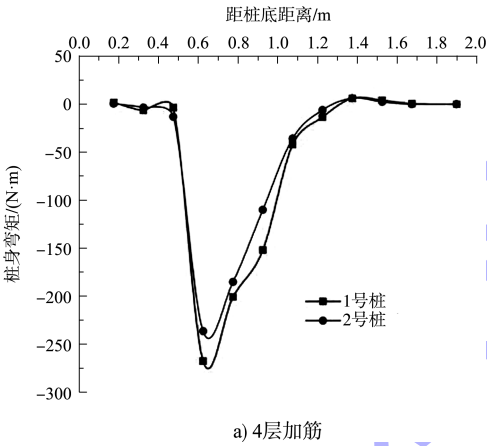


图 7 桩身弯矩分布曲线

由图 7 可见, 桩身弯矩曲线呈现“U”形, 在岩土分界面处达到峰值, 且 1 号桩身弯矩最大值较大, 原因是 1 号桩基位于排桩外侧, 边缘土

体的限制小, 变形较大导致桩身受力也较大。对比分析 2 种加筋条件下的桩身弯矩可知, 8 层加筋工况下桩身弯矩明显减小, 说明加筋工艺对减小桩身受力具有显著效果。

2 桩与加筋土相互作用数值模拟

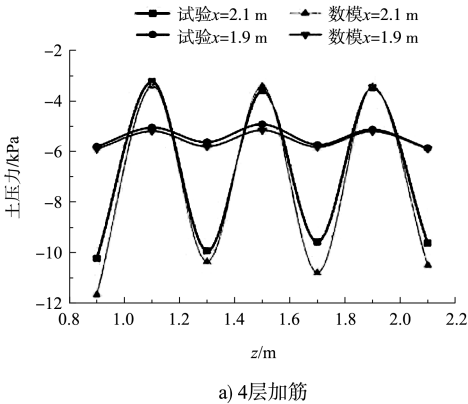
2.1 数值模型的建立及验证

数值模型中采用的填土及格栅属性参数在实际工程典型值范围中选取(表 2)。填土选择 Mohr-Coulomb理想弹塑性模型, 土工格栅采用杆单元进行模拟, 设置杆单元不受压来模拟土工格栅在土中受力的真实状态, 土工格栅与土体的接触是将格栅嵌入土体中。将桩土接触设置为面与面接触, 其中桩设为主面, 土体设为从面, 切向属性采用罚函数模拟, 摩擦系数设置为 0.3, 并添加法向属性, 不允许接触面分离。

表 2 材料物理参数取值					
材料	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$
填土	7	0.25	32	1.8	3
混凝土	$1.5\times 10^4$	0.30	—	2.0	—
桩基	$3.0\times 10^4$	0.30	—	2.4	—
土工格栅	$1.5\times 10^3$	0.20	—	—	—

注:  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $\varphi$  为内摩擦角,  $\rho$  为密度,  $c$  为填土黏聚力。

根据表 2 参数建立三维数值计算模型, 分别计算 4 层和 8 层加筋工况下桩后土压力, 并将计算结果与室内模型试验对比绘制曲线(图 8)。从图 8 可知, 数值计算结果与室内模型试验结果在数值大小和变化趋势上均保持较好的一致性, 因此可以将数值计算结果进行对比分析。



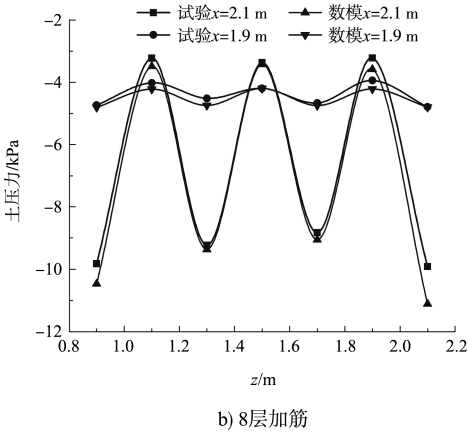


图 8 土压力对比曲线

2.2 加筋填方区土拱空间分布特征

选择 8 层加筋的工况计算结果进行分析，在  $y=1.025\text{ m}$  水平面，桩后  $3.75\text{ cm}$  ( $x=2.1\text{ m}$ )、 $13.75\text{ cm}$  ( $x=2.0\text{ m}$ )、 $23.75\text{ cm}$  ( $x=1.9\text{ m}$ ) 以及  $33.75\text{ cm}$  ( $x=1.8\text{ m}$ )，将 4 桩之间水平向和纵向的土压力值分布绘制成曲线(图 9)。

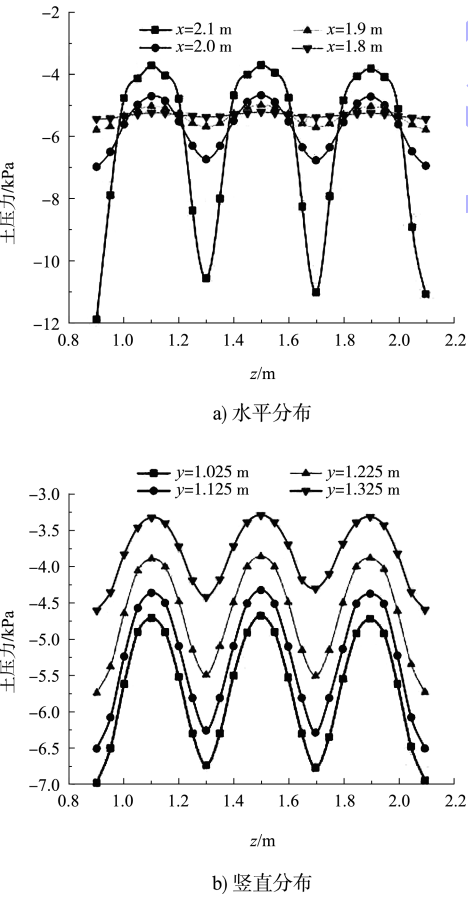


图 9 土拱效应分布

从图 9 可知，水平向土拱效应在靠近桩基处极为明显，桩后和桩间土压力差值近  $7\text{ kPa}$ ，在桩后  $3.75\sim13.75\text{ cm}$  区间内，土压力随着远离桩基而减小，最大值相差近  $4\text{ kPa}$ 。竖向上、下部土拱效应更为明显，下部的拱脚与拱间的压力差可达  $2.5\text{ kPa}$ ，这是由于下部土体更加密实，更容易形成稳定土拱。

3 加筋填方区土拱效应影响因素

3.1 加筋方式对土拱的影响

将加筋层数和筋带间距分别作为影响因子进行计算，首先分别选取 4、8、12 层和无筋 4 种工况，提取  $y=1.025\text{ m}$  水平面，桩后  $23.75\text{ cm}$  处，4 桩之间的水平土压力值进行比较。土压力曲线见图 10。从图 10 可知，随着加筋层数增加，桩后土拱效应逐渐增大，在 4~8 层筋带之间土压力增大较为明显，可达  $200\text{ kPa}$ ；而 8~12 层之间的变化较小。综合考虑经济效益，8 层加筋为较为合理的方式。

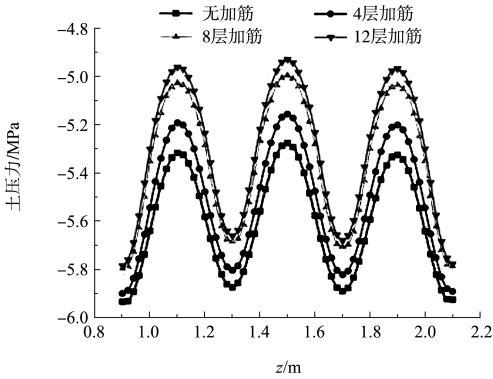


图 10 加筋层数对土拱影响曲线

选取 8 层加筋工况，将筋带间距作为变量，分别计算  $5、10、15、20\text{ cm}$  的桩后  $23.75\text{ cm}$ 、4 桩之间的土压力曲线(图 11)。从图 11 可见，随着筋带间距的增大，土拱效应显著增强，特别是由  $10\text{ cm}$  减小到  $5\text{ cm}$ ，最大土压力提升幅度近  $2\%$ ，综合考虑纵向土压力分布规律，在加筋填方区上部应采取减小筋带间距的方式进行布置。

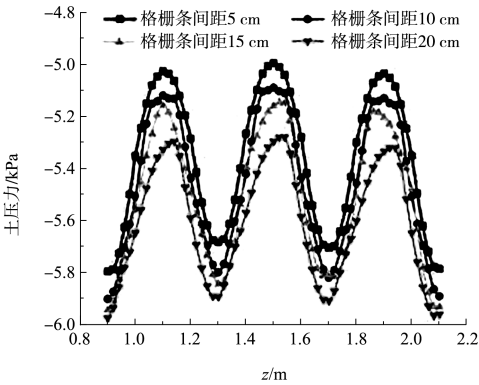


图 11 筋带间距对土拱影响曲线

3.2 边坡角度对土拱效应影响

选择加筋层数为 8、筋带间距 5 cm 的工况, 将坡脚变量设置为 30°、45°、60° 3 个取值。提取  $y = 1.025$  m 水平面, 桩后 23.75 cm ( $x = 1.9$  m) 处、4 桩之间分布的土压力值, 绘制土压力变化曲线(图 12)。从图 12 可知, 坡脚角度为 45°和 60°时的土压力值相差不大, 而 30°时土压力值有明显增加, 是由于坡度增大后, 填方区土体减小了向前挤出的趋势, 从而降低了水平向的土压力。3 种角度下的土拱曲线趋势基本一致。

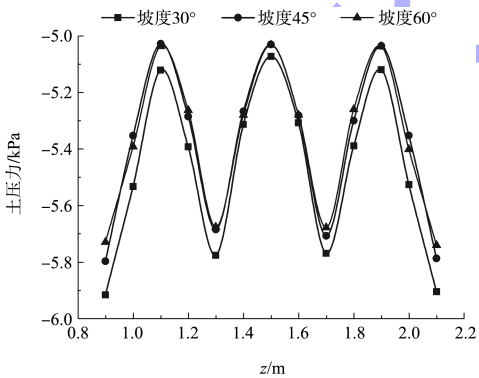
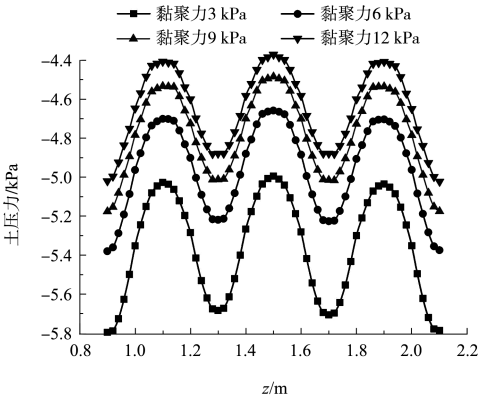


图 12 坡脚角度对土拱影响曲线

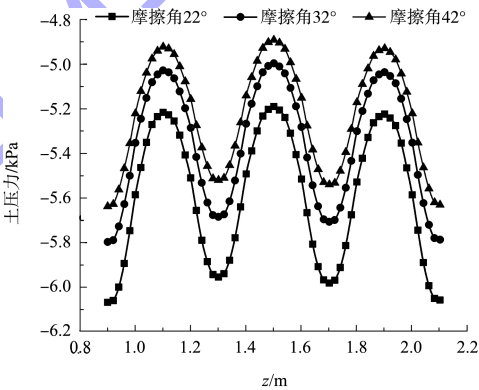
3.3 填方区土体参数对土拱的影响

填方区土体力学参数主要考虑黏聚力和内摩擦角两项, 选择加筋层数为 8 层, 间距为 5 cm。黏聚力分别为 3、6、9、12 kPa; 内摩擦角分别为 22°、32°、42°。取在  $y = 1.025$  m 水平面、桩后 23.75 cm ( $x = 1.9$  m) 处、4 桩之间的土压力并绘制土压力曲线(图 13)。由图 13 可见, 随着土体黏聚力和内摩擦角的增加, 土压力都呈

现减小趋势, 且减小的幅度由大变小。所不同的是, 黏聚力增大后土压力减小至一个相对稳定的值, 且土拱效应有所减小; 而内摩擦角增大导致土压力减小, 但土拱效应并未减弱。



a) 黏聚力影响



b) 摩擦角影响

图 13 土体力学参数对土拱影响曲线

4 加筋填方区土拱效应和桩基响应

土拱效应的形成和发展与桩基响应有着密切联系。按照加筋层数为 8 层、间距 5 cm、坡脚 45°、黏聚力 3 kPa、内摩擦角 32°的参数构建数值计算模型。坡顶堆载分析步设定为 20 帧, 每帧间隔加载时长为 12 h。选定纵向截面  $y = 1.025$  m 水平面为研究对象, 计算结果见图 14。

通过观察 20 帧的计算结果可见, 在第 1~9 帧间, 主要是桩间小土拱的初步形成期; 在第 10~15 帧间小土拱逐步发展和稳定期; 在第 16~18 帧间以桩基为拱脚的桩后大土拱逐步形成和稳定, 是大小土拱共同作用期; 在第 19~20 帧间桩间小土拱发生破坏, 形成桩后大土拱的稳定期。

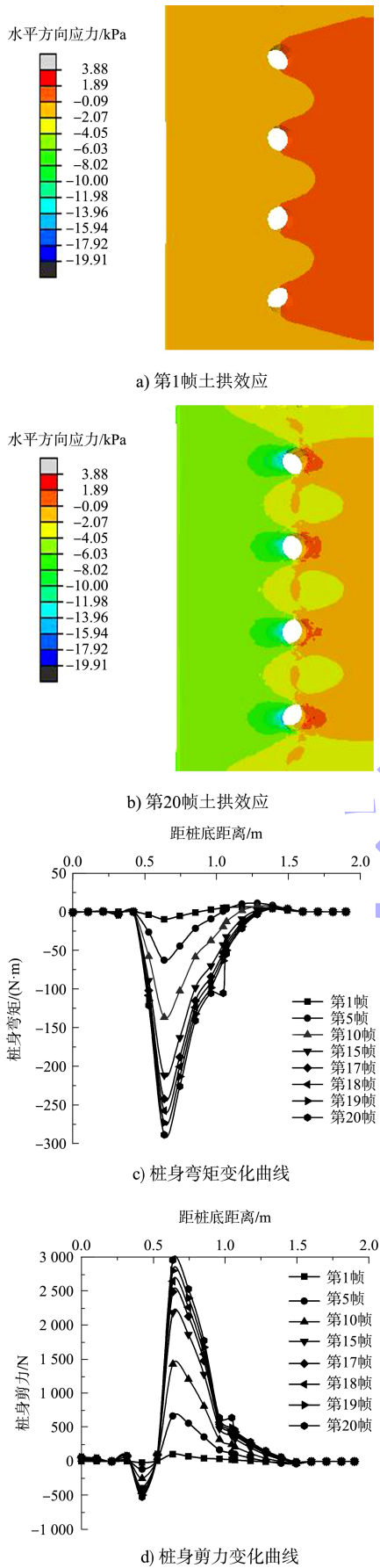


图 14 土拱效应与桩基响应

从桩基的剪力和弯矩曲线可见，随着桩后土拱发展导致的土压力增加，桩身内力也不断增大，桩基响应是伴随桩后土拱效应发展而增大的一个过程。

### 5 结论

1) 加筋工艺在高填方区的应用可以改善填方土体的不均匀沉降等问题，加筋效应可以减小因土体变形对桩基的作用力，对降低桩基水平向受力的效果显著。

2) 加筋填方区土体内在桩后可以形成水平向和竖向土拱效应：对水平向土拱而言，越靠近桩基越明显；对竖向土拱效应而言，填方区下部较上部更为明显。

3) 加筋层数为 8 层、筋带间距 5 cm、坡脚 45°、黏聚力 3 kPa、内摩擦角 32°为最优方案。在进行加筋土填方区设计时，应该选择摩擦角和黏聚力都较大的土体，要尽量达到二者最优解，参数须结合现场环境、通过现场试验确定。

4) 综合考虑计算结果与码头高填方区实际，宜将填方坡角定为 30°。加筋的层数和间距应根据工程实际开展现场试验确定，求得综合考虑工程造价和加筋效果的最优解。

### 参考文献：

[1] 邓洁, 罗思妤, 孙书盛, 等. 基于灰色关联度模型的重庆港口与城市经济互动发展研究[J]. 时代经贸, 2018(6): 51-53.

[2] 周世良, 王永艺, 廖冬. 山区河流港口工程斜坡嵌岩桩双向承载特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(5): 162-167, 227.

[3] 曾智高, 朱信华, 孙昌利, 等. 库区环境下某码头桩基受力特性及岸坡稳定分析[J]. 广东水利水电, 2018(5): 28-31.

[4] 刘洪超. 基于工程实例的渠道膨胀土边坡滑坡处理与探讨[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 92-96.

[5] 唐名富, 全洪波, 程峰, 等. 桂北山区含碎石粘土边坡变形破坏机制及生态防治[J]. 矿产与地质, 2017, 31(5): 999-1003.

[6] 徐光斌. 岩堆路基维稳处治技术及工程应用研究[J].

交通科技, 2017(6): 9-12.

[7] 马显春, 罗刚, 邓建辉, 等. 陡倾滑面堆积层滑坡抗滑桩锚固深度研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 157-168.

[8] 刘世杰, 苏生瑞, 黄璜, 等. 库水位周期波动对抗滑桩加固效果影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 60-65.

[9] 邵巧希, 胡蓉. 基于强度折减法的抗滑桩加固路基稳定性分析[J]. 土工基础, 2018, 32(6): 620-624.

[10] 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.

[11] 彭瑜, 陈洪凯. 基于桩间距计算的梯形抗滑桩桩侧角取值[J]. 水运工程, 2018(12): 202-207.

[12] 傅鹏辉, 贺可强, 张朋, 等. 新型微型桩群设计理论及抗滑机理研究[J]. 工程建设, 2017, 49(11): 6-10, 14.

[13] 邓零伟. 圆截面 h 型抗滑桩主要结构参数影响分析[J]. 西南公路, 2018(4): 49-54.

[14] ASHOUR M, ARDALAN H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction[J]. Computers and geotechnics, 2012, 39: 85-97.

[15] POULOS H F G. Design of reinforcing piles to increase slope stability[J]. Canadian geotechnical journal, 1995. 32(5): 808-818.

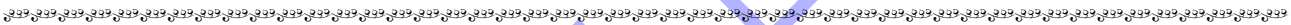
[16] 梅甫良, 李桂苓. 水平和轴向荷载下单桩变形内力的状态空间解[J]. 科技通报, 2017, 33(1): 164-169.

[17] 宋修广, 李信, 万立尧, 等. 堆载作用下被动桩的水平受力及位移分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 56-62.

[18] 魏汝龙, 王年香, 杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用[J]. 岩土工程学报, 1992(6): 38-49.

[19] 黄伟达. 深厚软基填方边坡变形控制及对策[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(3): 125-129.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 128 页)

3) 本滩疏浚设计河底采用挖槽上下端河床地形作为控制高程, 对削弱横流、降低局部大流速及消除滩内跌水起到了很好的作用; 在弯道凹岸布置丁顺坝后, 有利于提高中枯水期航槽冲刷能力, 改善弯道水流条件。整治方案效果显著, 能够保证船舶安全通行。

4) 计算结果表明, 工程实施后的航道条件能够满足设计要求, 中枯水期水面比降和大流速区有所缓解, 航槽冲刷能力有所提升, 船舶能够在该滩正常航行。

参考文献:

[1] 谢玉杰, 余祥, 李家世, 等. 嘉陵江亭子口枢纽变动回水区通航流量及保证率分析[J]. 水运工程, 2021(1): 174-177, 201.

[2] 周勤, 马倩, 何进朝, 等. 嘉陵江草街—北碚段航道整治效果及补水需求分析[J]. 水运工程, 2019(7): 149-154.

[3] 索文, 刘林双, 于海波, 等. 芦家河水道枯水跌坎形成原因及航道治理效果分析[J]. 水运工程, 2020(3): 69-73, 128.

[4] 应翰海, 关宏旭. 福姜沙中水道船舶操纵模拟试验研究[J]. 水运工程, 2020(9): 126-131.

[5] 何熙, 李顺超, 李家世. 嘉陵江川境段航运配套工程二期工程二批次滩险整治工程(亭子口库区) 数值模拟研究专题报告[R]. 成都: 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 2018.

[6] 周家俞, 徐奎, 黄成林. 山区河流枢纽库尾河段航道整治模型试验研究[J]. 水运工程, 2018(10): 143-147.

[7] 李顺超, 王斐, 章日红. 黄河银川段贺兰滩群航道整治方案研究[J]. 水道港口, 2016, 37(4): 411-415, 438.

[8] 徐军辉, 邓伟. 梯级电站变动回水区设计最低通航水位确定方法[J]. 水运工程, 2020(4): 109-114.

[9] 张玮, 徐晶鑫. 长江下游感潮河段造床流量计算研究[J]. 水运工程, 2017(4): 8-14.

[10] 长江航道规划设计研究院, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

(本文编辑 王璁)