

排桩加固内河重力式护岸计算分析

钟华林¹, 肖洪杰², 刘江林¹

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 针对采用排桩加固重力式护岸时, 护岸会影响桩后土压力的问题, 进行了排桩后土压力分布规律及桩身弯矩计算研究。采用有限元分析方法, 得出结果: 当排桩与护岸间不填土时, 排桩在墙身高度范围内不受水平力; 排桩在护岸基底处承受作用在桩身的基底局部力, 由土体变形引起, 约为基底摩擦力的24%; 当墙前疏浚时, 基底局部力会消失; 当土体黏聚力增大时, 基底局部力减小; 当护岸宽度增大时, 基底局部力减小。当排桩与护岸间有填土时, 可按有限范围填土情况计算该部分土压力。研究表明: 根据以上土压力分布规律, 采用易工及有限元软件进行计算, 考虑墙前疏浚不加载基底局部力, 加载有限范围填土土压力, 计算得到护岸会减小桩身弯矩, 减小约20%。通过对比易工和有限元计算结果, 发现以上加载模式和计算方法可以用于工程设计。

关键词: 排桩; 重力式护岸; 基底局部力; 土压力分布; 桩身弯矩; 有限范围填土压力

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0156-07

Calculation of row pile reinforcement for inland river gravity revetment

ZHONG Hualin¹, XIAO Hongjie², LIU Jianglin¹

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: A study is conducted on the distribution law of soil pressure behind piles and the calculation of pile bending moment to address the issue of the impact of pile reinforcement on gravity revetments. Using finite element analysis method, the results show that when there is no soil filling between the pile and the revetment, the pile is not subjected to horizontal force within the height range of the wall. The pile foundation bears the local force acting on the pile body at the base of the revetment, caused by soil deformation, which is about 24% of the base friction force. When dredging in front of the wall, local forces on the foundation will disappear. When the cohesion of the soil increases, the local force on the foundation decreases. When the width of the revetment increases, the local force on the foundation decreases. When there is soil filling between the pile and the revetment, the soil pressure can be calculated based on the limited range of soil filling. The research indicates that based on the above distribution law of soil pressure, using Yigong software and finite element software for calculation, considering that dredging in front of the wall does not load local forces on the foundation, but loads a limited range of backfill soil pressure, it is calculated that revetment will reduce the bending moment of the pile body by about 20%. By comparing the results of Yigong and finite element calculations, it is found that the above loading modes and calculation methods can be used for engineering design.

Keywords: row pile; gravity based revetment; local force at the base; earth pressure distribution; pile body bending moment; limited range filling pressure

收稿日期: 2025-05-26 录用日期: 2025-07-02

作者简介: 钟华林(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计研究工作。

重力式护岸^[1]是江苏省内河航道常用的一种结构形式, 耐久性好、稳定性好, 适用于水位差小、地质好的航段。近年来, 江苏省着力打造更具特色的“水运江苏”, 部分航道等级由 III 级提升为 II 级, 航道宽度由 45 m 加宽到 60~70 m, 航道水深由 3.2 m 加大到 4.0 m。航道按 II 级标准疏浚后, 将会降低护岸墙前泥面, 对于重力式护岸, 墙前泥面设计高程可能降至底板以下, 护岸不稳定, 设计时一般在墙前采用排桩进行加固。本文主要研究排桩加固重力式护岸时, 桩后土压力分布规律和护岸对桩身弯矩的影响。

刘旭等^[2]对 U 形桩加固老护岸的土压力计算方法进行了探讨; 李树巍等^[3]对板桩加固护岸沉降计算方法进行研究; 许春虎等^[4]对板桩加固护岸的受力机制进行了现场试验研究; 陈永辉等^[5]对板桩加固护岸结构进行有限元分析; 刘勇军等^[6]对限制性航道护岸不同板桩加固方案进行了总结。以上研究均未对排桩加固重力式护岸桩后土压力受力机理及影响因素进行系统分析。

重力式护岸会影响排桩后土压力分布, 本文采用有限元软件对桩后土压力分布规律和影响因素进行了计算分析; 根据分布规律提出了荷载的加载模式, 分别采用易工和有限元软件对排桩结构进行计算, 计算结果显示, 本文的计算方法可以为设计工作提供技术支撑。

1 案例概述

某 III 级航道护岸为重力式混凝土结构, 墙顶高程 3.40 m, 底板底高程-1.30 m, 压顶宽 0.6 m, 底板宽 5.0 m, 底板座落于粉质黏土层。航道提升为 II 级后, 墙前泥面高程由-0.80 m 降低至-2.67 m, 在墙前采用 600 mm 厚护壁桩^[7]加固, 桩顶高程 2.30 m, 桩底高程-15.00 m, 护壁桩与原护岸之间填土种植绿化。结构方案见图 1, 设计水位见表 1。

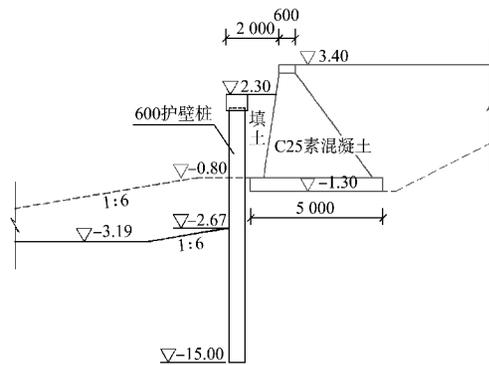


图 1 护岸结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)
Fig. 1 Cross-section of revetment structure (dimension: mm; elevation: m)

表 1 设计水位
Tab. 1 Design water level

上游设计最高通航水位/m	上游设计最低通航水位/m	上游常水位/m
3.06	0.81	1.33

2 有限元数值分析模型

采用 Abaqus 有限元软件对排桩加固重力式护岸的排桩受力进行计算分析。为简化计算, 将重力式护岸简化为 5 m×5 m (宽×高) 的正方体, 墙顶高程取 5.00 m, 墙前泥面高程取 0 m, 有限元整体模型见图 2。

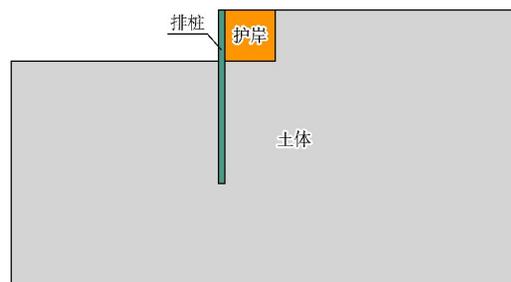


图 2 有限元整体模型
Fig. 2 Overall finite element model

2.1 整体模型

2.1.1 排桩、重力式护岸结构模型

排桩、重力式护岸结构采用三维实体单元 C3D8R 模拟。本构模型采用线弹性模型, 弹性模量 $E=28.0 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.167$ 。

2.1.2 土体本构模型

对土体建立三维有限元模型, 土体采用三维实体单元 C3D8R 模拟。本构模型采用弹塑性模型, 应力应变关系采用 Mohr-Coulomb 模型。为简

化计算,对土体进行归并,原状土和回填土采用统一参数,见表2。

表2 土体本构模型参数
Tab.2 Soil constitutive model parameters

密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
1.90	20.0	0.30	0.01	28

2.2 接触的设置

重力式护岸与地基土、回填土之间设置接触对;排桩与土体、重力式护岸之间设置接触对。法向设置硬接触,切向设置摩擦。除排桩与护岸间摩擦系数取0.55外,其余取0.35。

2.3 初始地应力平衡

为了得到有初始应力无初始应变的重力式护岸和土体模型,需要进行地应力平衡^[8]。在静力分析步前添加地应力分析步,对不含排桩的重力式护岸和土体模型施加重力荷载进行计算,平衡后地基变形小于1.0×10⁻⁵ m,满足工程精度要求。

3 排桩后土压力分布及影响因素分析

为简化分析,本节计算不考虑水位的作用,不考虑材料浮重度及排桩前后水压力。

3.1 排桩后土压力分布

3.1.1 无重力式结构时排桩后土压力

根据JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[9],板桩墙后由土体本身产生的主动土压力水平强度标准值可按式计算:

$$e_{ax} = (\sum \gamma_i h_i) K_a \cos\delta - 2c \frac{\cos\varphi \cos\delta}{1 + \sin(\varphi + \delta)} \quad (1)$$

$$e_{aqx} = qK_a \cos\delta \quad (2)$$

$$K_a = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta [1 + \sqrt{\sin(\varphi + \delta) \sin\varphi / \cos\delta}]^2} \quad (3)$$

式中: e_{ax} 为由土体本身产生的主动土压力水平强度标准值, kPa; γ_i 为计算面以上各层土的重力密度, kN/m³; h_i 为计算面以上各层土的厚度, m; K_a 为计算土层土的主动土压力系数; δ 为计算土层土与墙面间的摩擦角, (°); c 为计算土层土的黏聚力, kN/m²; φ 为计算土层土的内摩擦角, (°); e_{aqx} 为由均布荷载作用产生的主动土压力水平强度

标准值, kN/m²; q 为均布荷载标准值, kN/m²。

根据式(1)~(3)计算获得排桩后主动土压力水平强度理论值,再采用有限元软件计算排桩后土压力水平强度。两者计算结果与对比见表3。

表3 排桩后土压力水平强度计算结果(无重力式结构)
Tab.3 Calculation results of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement (non-gravity structure)

计算高程/m	土压力水平强度/(kN·m ⁻²)	
	理论值	有限元值
5.0	0	0
3.0	12.54	11.57
1.0	25.08	23.56
0.5	28.21	27.58
0.0	31.34	29.45
-0.5	34.48	29.61
-1.0	37.61	34.28
-3.0	50.15	51.55
-5.0	62.69	68.45
-7.0	75.23	82.25
-9.0	87.76	94.35

3.1.2 有重力式结构时排桩后土压力

不考虑重力式护岸对板桩产生的水平力;重力式护岸基底应力取均载 $q = 125$ kN/m²。根据码头结构设计规范计算墙后主动土压力水平强度的结果与采用有限元软件计算排桩后土压力水平强度的结果见表4。

表4 排桩后土压力水平强度计算结果(重力式结构)
Tab.4 Calculation results of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement (gravity structure)

计算高程/m	土压力水平强度/(kN·m ⁻²)	
	理论值	有限元值
5.0	0	0
3.0	0	0
1.0	0	0
0.5	0	0
0.0	41.24	62.25
-0.5	44.38	63.25
-1.0	47.51	56.65
-3.0	60.05	67.47
-5.0	72.59	78.40
-7.0	85.12	89.75
-9.0	97.66	99.35

3.1.3 结果分析

综上, 排桩后土压力水平强度分布见图 3。由图可知, 不考虑重力式护岸时, 排桩后土压力水平强度由上至下为三角形分布, 有限元计算值与理论值较为接近。考虑重力式护岸时, 护岸高度范围内(0~5 m)无土压力; 护岸基底以下土压力水平强度按梯形分布, 有限元结果在基底处土压力水平强度突增, 在其下 1 m 范围内慢慢减小, 直至恢复正常。说明排桩后有重力式护岸时, 护岸后土压力在基底产生的摩擦力使土体产生向前的变形, 传递到排桩上, 相当于在排桩上施加了一个基底局部力(重力式护岸基底对排桩产生的局部力), 该局部力随深度慢慢消散。

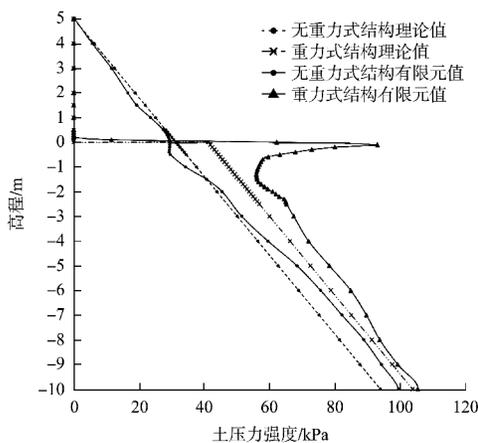


图 3 排桩后土压力水平强度分布

Fig. 3 Distribution of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement

对有重力式护岸的排桩后土压力水平强度有限元值, 按高程较深处的强度变化率进行修正, 修正值与有限元值见图 4。对有限元值沿高度进行积分, 再减去修正值沿高度的积分值, 就得到基底局部力, 见表 5。基底局部力 16.2 kN, 护岸墙底摩擦力 68.2 kN, 基底局部力大小约为摩擦力的 24%。

表 5 墙底摩擦力及基底局部力计算结果

Tab. 5 Calculation results of frictional force at bottom of the wall and local force at the base of pile foundation

排桩后土压力/kN	基底局部力 (有限元值- 修正值)/kN	墙底摩擦力 (有限元值)/ kN	(局部力/ 摩擦力)/ %
有限元值 修正值			
798.08 781.88	16.2	68.2	24

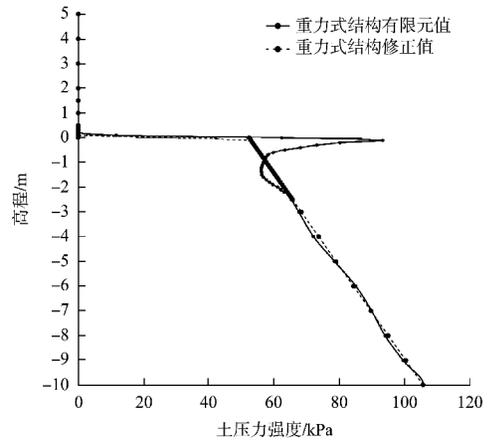


图 4 排桩后土压力水平强度有限元及修正值

Fig. 4 Finite element and correction values of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement

3.2 疏浚深度对排桩后土压力影响

分别取墙前不疏浚、疏浚 1 m、疏浚 2 m 计算排桩后土压力水平强度。不同疏浚深度时排桩后土压力水平强度沿高程的分布见图 5。

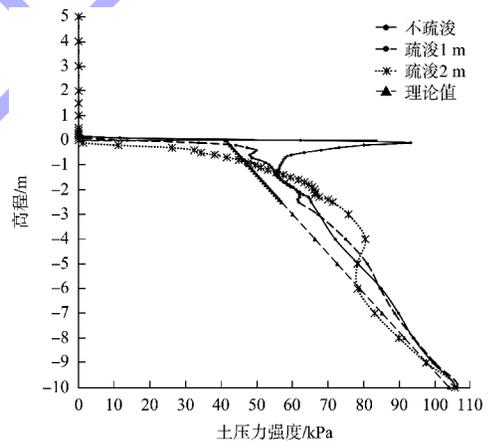


图 5 不同疏浚深度时排桩后土压力水平强度分布

Fig. 5 Distribution of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement at different dredging depths

由图 5 可知, 墙前不疏浚时, 重力式护岸基底对排桩产生基底局部力, 随深度消散; 墙前疏浚时, 重力式护岸基底对排桩不产生基底局部力。墙前不疏浚时, 排桩在土压力作用下产生的变形小于护岸基底土体变形, 从而护岸基底摩擦力通过土体作用在桩身, 在一定深度内形成基底局部力, 该局部力随深度慢慢消散; 墙前疏浚时, 排桩在墙后土压力作用下产生的位移大于护岸基底土体变形, 因此护岸基底摩擦力不会作用到桩身。

3.3 土体黏聚力对排桩后土压力影响

分别取土体黏聚力 $c=0.01、5.00、20.00$ kPa, 不考虑墙前疏浚, 计算排桩后土压力水平强度。不同土体黏聚力时排桩后土压力水平强度沿高程的分布见图 6。

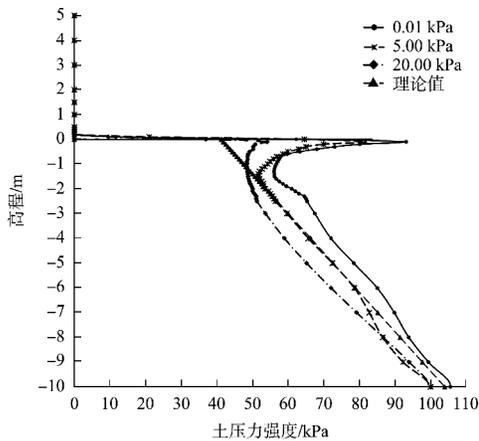


图 6 不同黏聚力时排桩后土压力水平强度分布
Fig. 6 Distribution of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement under different cohesive forces

由图 6 可知, 重力式护岸基底对排桩产生的基底局部力, 随土体黏聚力的增大而减小。由于黏聚力能够减小土体变形, 黏聚力越大, 吸收的基底摩擦力越多, 基底对桩身产生的基底局部力也就越小。

3.4 护岸宽度对排桩后土压力影响

分别取重力式护岸宽度 $B=4、5、6$ m, 不考虑墙前疏浚, 计算排桩后土压力水平强度。不同护岸宽度时排桩后土压力水平强度沿高程的分布, 见图 7。

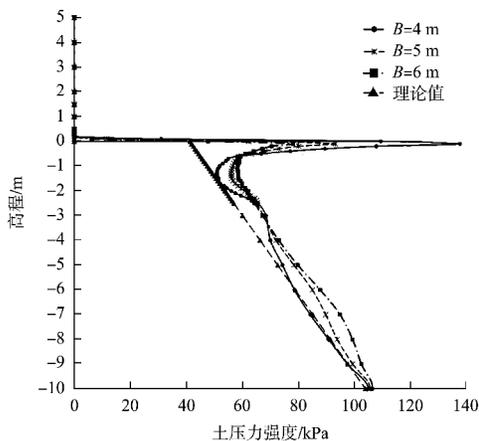


图 7 不同护岸宽度排桩后土压力水平强度分布
Fig. 7 Distribution of horizontal strength of soil pressure after pile arrangement at different revetment widths

由图 7 可知, 护岸宽度越大, 基底对桩身产生的基底局部力越小。护岸宽度越大, 基底土体产生变形的范围越大, 吸收相同的摩擦力, 土体产生的变形越小, 对桩身产生的基底局部力也越小。可以认为, 护岸宽度越大, 护岸后方土压力通过基底传递到桩身上的基底局部力越小; 护岸宽度越小, 护岸后方土压力在被基底摩擦力抵消一部分后, 仍然有一部分在基底通过近似集中力的形式作用到桩身上。

考虑到原重力式护岸基本都能保持稳定, 本文后续分析中不考虑因护岸宽度较小所产生的基底局部力。

4 排桩加固重力式护岸结构计算

分别采用有限元软件和易工软件对本文前述航道护岸结构进行计算, 对计算结果进行对比分析。计算取设计最高通航水位和设计最低通航水位两个工况。

4.1 有限元计算模型

排桩、护岸及土体整体有限元模型见图 8。考虑水位的作用, 材料水下重力密度取浮重力密度, 排桩前后计入水压力, 高水期桩顶淹没, 排桩前后水位一致, 低水期墙后水位高于墙前 0.8 m。承载能力极限状态综合分项系数取 1.40, 正常使用极限状态综合准永久值系数并取 0.85。

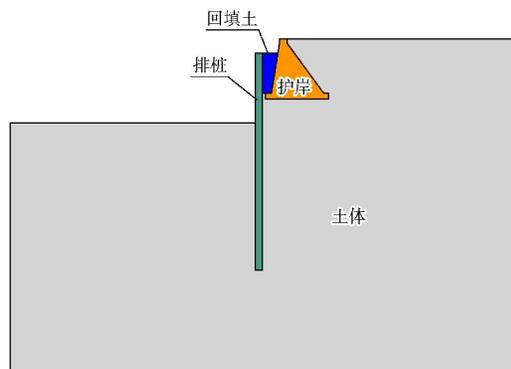


图 8 排桩加固重力式护岸有限元整体模型
Fig. 8 Overall finite element model of reinforced gravity revetment with pile arrangement

4.2 易工计算模型

采用易工软件计算时, 将重力式护岸结构作为土体, 为消除该层土的土压力, 其内摩擦角取 90° ; 保守考虑, 将原护岸结构基底应力最大值减去无护岸时土在基底处的应力, 差值作为均载加

载在土体表面。墙前疏浚, 泥面下降 1.86 m, 根据本文第 3.2 节, 护岸基底摩擦力不会作用到桩身, 因此在基底处不考虑重力式护岸对排桩基底局部力的作用。

重力式护岸前立面与排桩间空隙有回填土, 按有限范围填土情况计算土压力。根据 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》^[10], 当挡墙后土体破裂面以内有较陡的稳定岩石坡面时, 应视为有限范围填土情况计算主动土压力, 按下式计算:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (4)$$

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha - \delta + \theta - \delta_r) \sin(\theta - \beta)} \quad (5)$$

$$\left[\frac{\sin(\alpha + \theta) \sin(\theta - \delta_r)}{\sin^2 \alpha} - \eta \frac{\cos \delta_r}{\sin \alpha} \right] \quad (6)$$

$$\eta = \frac{2c}{\gamma H} \quad (7)$$

式中: E_a 为相应于荷载标准组合的主动土压力合力, kN/m; γ 为土体重力密度, kN/m³; H 为挡土墙高度, m; α 为支挡结构墙背与水平面的夹角, (°); β 为填土表面与水平面的夹角, (°); θ 为稳定岩石坡面倾角, (°); δ_r 为稳定且无软弱层的岩石坡面与填土间的内摩擦角, (°); η 为系数。

将重力式护岸结构的前立面视为较陡的稳定岩石坡面, 取 $\alpha=90^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 、 $\theta=81^\circ$ 、 $\delta=0.33\varphi$ 、 $\delta_r=0.5\varphi$, 主动土压力合力与排桩墙背垂面的夹角为 δ , 故排桩墙后主动土压力合力水平分力 $E_{ax} = E_a \cos \delta$ 。采用易工软件计算时将该水平分力作为集中力加载到计算模型, 见图 9。

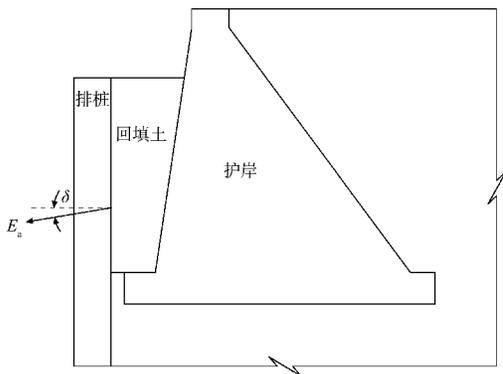


图 9 有限范围填土土压力示意
Fig. 9 Schematic diagram of limited range filling soil pressure

4.3 计算结果分析

有限元软件和易工软件计算的桩身弯矩结果见表 6, 易工软件计算的低水期各荷载产生的弯矩值见表 7, 踢脚稳定计算结果见表 8。为便于对比, 同时列出了排桩后无重力式护岸的计算结果。

表 6 排桩桩身弯矩计算结果

Tab. 6 Calculation results of bending moment of row pile (kN·m·m⁻¹)

工况		有重力式护岸		无重力式护岸	
		有限元	易工	有限元	易工
承载能力	高水期	194	321	295	381
极限状态	低水期	639	574	776	725
正常使用	高水期	119	195	180	231
极限状态	低水期	400	349	482	440

表 7 低水期各荷载产生的桩身弯矩

Tab. 7 Bending moment of pile body generated by various loads during low water period

荷载来源	有重力式护岸		无重力式护岸	
	桩身弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	比例/%	桩身弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	比例/%
原状土土压力	165	48	323	73
剩余水压力	117	33	117	27
回填土土压力	67	19	-	-
合计	349	100	440	100

表 8 排桩踢脚稳定计算结果

Tab. 8 Calculation results of stability of row pile baseboard

工况	计算方法	倾覆力矩/(kN·m)	稳定力矩/(kN·m)
无挡墙	有限元	7 766	10 062
	易工	7 998	10 062
有挡墙	有限元	7 862	10 062
	易工	8 021	10 062

低水期为最不利工况, 以正常使用极限状态低水期为例, 桩身最大弯矩在桩后有护岸的结果小于无护岸的结果。有限元计算时, 有、无护岸的桩身最大弯矩分别为 400、482 (kN·m)/m, 前者是后者的 83%; 易工软件计算时, 有、无护岸的桩身最大弯矩分别为 349、440 (kN·m)/m, 前者是后者的 79%。重力式护岸的存在可以减小排桩的桩身弯矩约 20%, 设计中应当考虑护岸作用。

由表 7 可知, 有、无重力式护岸时桩身弯矩的差异主要体现在土压力上。有重力式护岸时, 墙后土压力分为两部分, 分别为: 1) 护岸基底后

力及土体自重力产生的原状土土压力 F_{1-1} ；2) 排桩与护岸之间回填土产生的土压力 F_{1-2} 。无重力式护岸时仅有原状土土压力。将无重力式护岸土压力分为两部分，分别为：1) 护岸高度范围内的土压力 F_{2-1} ；2) 护岸高度范围以下的土压力 F_{2-2} 。以低水期为例， F_{1-2} 与 F_{2-2} 基本相当，而 $F_{1-1} = 16.8 \text{ kN/m}$ 、 $F_{2-1} = 55.3 \text{ kN/m}$ ，从而导致桩身弯矩差异较大。

以正常使用极限状态低水期为例，有重力式护岸时，桩身弯矩有限元结果和易工结果分别为 400 、 $349(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$ ，前者是后者的 1.15 倍；无重力式护岸时，桩身弯矩有限元结果和易工结果分别为 482 和 $440(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$ ，前者是后者的 1.10 倍。由表 8 可知，排桩加固重力式护岸踢脚稳定满足要求，有限元结果与易工结果较为接近。可见，采用易工软件简化计算时，根据本文提出的荷载加载模式进行加载，其计算结果可靠，适当留有富余后，可以用于工程设计。易工软件可以设定排桩纵向间距，因此本文计算方法还适用于排桩间距加大、排桩间采用高度较小的板桩挡土的长短桩结构。

5 结论

1) 排桩加固重力式护岸，排桩与护岸间不填土时，排桩在墙身高度范围内不受土压力；在墙底受基底局部力，由护岸基底摩擦力引起的土体变形产生。当墙前疏浚时，基底局部力会消失；当土体黏聚力增大时，基底局部力减小；当护岸宽度增大时，基底局部力减小。

2) 排桩加固重力式护岸，排桩与护岸间有填土时，排桩在墙身高度范围内承受土压力，该部分土压力按有限范围填土情况计算；在墙底受基底局部力。

3) 针对本文案例，根据易工和有限元软件计算结果，相较于无重力式护岸，排桩后有重力式护岸的桩身弯矩可以减小约 20% 。

参考文献：

- [1] 韩理安. 港口水工建筑物 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008: 267-268.
HAN L A. Port hydraulic structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008: 267-268.
- [2] 刘旭, 陈斌, 武昭融, 等. U 型板桩加固老护岸土压力计算方法探讨 [J]. 珠江水运, 2023(23): 43-46.

LIU X, CHEN B, WU Z R, et al. Discussion on calculation method of soil pressure for strengthening old revetment with U-shaped sheet pile [J]. Pearl River water transport, 2023(23): 43-46.

- [3] 李树巍, 徐瑾瑾, 许春虎. 板桩加固护岸沉降计算方法研究 [J]. 山西建筑, 2013, 39(2): 62-64.
LI S W, XU J J, XU C H. Research on calculation method of plate pile reinforcement revetment settlement [J]. Shanxi architecture, 2013, 39(2): 62-64.
- [4] 许春虎, 陈永辉, 王新泉, 等. 板桩加固护岸桩身受力现场试验研究 [J]. 水运工程, 2012(3): 14-19.
XU C H, CHEN Y H, WANG X Q, et al. Field experimental study on force on the body of sheet pile reinforced revetment [J]. Port & waterway engineering, 2012(3): 14-19.
- [5] 陈永辉, 何彬, 许春虎. 板桩加固护岸结构有限元分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 1-6.
CHEN Y H, HE B, XU C H. Finite element analysis of sheet pile reinforcing revetment [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2013, 11(3): 1-6.
- [6] 刘勇军, 池名扬, 管宇豪. 限制性航道护岸不同板桩加固技术研究 [J]. 水上安全, 2023(9): 16-18.
LIU Y J, CHI M Y, GUAN Y H. Research on different sheet pile reinforcement techniques for restricted waterway revetment [J]. Maritime safety, 2023(9): 16-18.
- [7] 预制混凝土板桩式挡土墙技术规程: T/CHES 28—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Technical specification for precast concrete sheet pile retaining wall: T/CHES 28-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [8] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 298-299.
FEI K, ZHANG J W. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 298-299.
- [9] 码头结构设计规范: JTS 167—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [10] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical code for building slope engineering: GB 50330-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

(本文编辑 赵娟)