



航道开挖对护岸结构影响的离心模型试验研究*

吴文华¹, 安晓宇^{2,3}, 刘勇军¹, 杨立功², 张宇亭²

(1. 湖州市港航管理中心, 浙江 湖州 313000;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456;

3. 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了研究航道开挖对新老护岸结构的影响, 依托东宗线航道四改三工程, 利用大型土工离心模型试验平台研究航道开挖对老挡墙护岸结构、新施工钢板桩的受力和变形特征的影响, 得出航道开挖过程中板桩两侧土压力的分布规律。结果表明, 随开挖深度增加, 靠岸侧(主动侧)土压力逐渐减小; 受板桩位移、变形及离心模型试验重液影响, 临水侧(被动侧)土压力部分减小, 底部土压力增大。开挖卸载导致老挡墙呈现向水侧移动且向后翻转的趋势。设计工况的极限开挖深度约为3.6 m, 此时钢板桩顶部帽梁的水平位移达到0.069 m; 对于6、8和10 m 3种长度的板桩, 其极限开挖深度约为0.5~0.6倍桩长, 且随着桩长增加极限开挖深度逐渐降低。研究得出不同板桩长度下开挖深度的阈值, 可为工程建设提供技术参数。

关键词: 航道; 板桩; 挡墙; 离心模型试验

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0232-07

Centrifugal model test study on influence of channel excavation on revetment structure

WU Wenhua¹, AN Xiaoyu^{2,3}, LIU Yongjun¹, YANG Ligong², ZHANG Yuting²

(1. Huzhou Port and Shipping Management Center, Huzhou 313000, China;

2. National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology,

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To study the influence of channel excavation on the new and old revetment structure, the influence of channel excavation on the force and deformation characteristics of old retaining wall and newly constructed steel sheet pile is studied by using a large-scale geotechnical centrifugal model test platform based on 4-to-3 project of Dongzong Channel, and the distribution law of soil pressure on both sides of the sheet pile during channel excavation is obtained. The results show that with the increase of excavation depth, the earth pressure on the bank side (active side) decreases gradually, and the earth pressure on the water side (passive side) partly decreases under the influence of sheet pile displacement, deformation and heavy liquid of centrifugal model test, the earth pressure increases at the bottom. The excavation unloading causes the old retaining wall to move to the water side and turn backward. The limit excavation depth of the design condition is about 3.6 m, and the horizontal displacement of the cap beam at the top of the steel sheet pile reaches 0.069 m. For sheet piles with 3 lengths of 6, 8 and 10 m, the limit excavation depth is about 0.5-0.6 times the pile length, and the limit excavation depth gradually decreases with the increase of pile length. The threshold values of excavation depth under different sheet pile lengths are obtained, which can provide technical parameters for engineering construction.

Keywords: waterway; sheet pile; retaining wall; centrifugal model test

收稿日期: 2023-11-06

*基金项目: 中央级公益性科研院所科研创新基金项目(TKS20230107)

作者简介: 吴文华(1974—), 男, 正高级工程师, 从事港航工程研究。

浙江省杭嘉湖地区河道纵横、水运发达,“十四五”时期,为进一步发挥水运优势,新一轮的航道升级改造工作正在全面展开。由于航道沿线土地利用空间有限,考虑通过加固现有护岸结构和疏浚底泥完成航道升级。

早在明清时代,板桩便应用于河道的整治工程中,采用其对航道岸坡进行加固^[1],众多学者在航道整治工程中板桩的受力和变形机制方面开展了一系列研究工作。蒋永明等^[2]介绍了板桩在内河航道中的应用和研究方法,通过理论分析和现场试验研究板桩在水利工程中所发挥的作用。莫倩倩等^[3]采用有限元软件 ABAQUS 建立垂直护岸板桩数值分析模型,研究板桩的弹性模量、波浪的波高和波长对桩身水平位移的影响。张建强等^[4]依托平湖和湖州的航道护岸工程开展现场试验,分析 U 形钢筋混凝土板桩和 U 形钢板桩的变形和受力特性及岸后土体的位移规律。索红义等^[5]结合苏南运河常州段三级航道整治工程,指出钢板桩不仅有优异的工程承载性能,满足工程安全性要求,并对钢板桩护岸与重力式护岸进行经济性比较分析。许春虎等^[6]结合长湖申航道湖州段板桩加固护岸实体工程,通过现场试验完整测试板桩在凝固硬化过程中钢筋应力计受力情况和护岸荷载施加过程中的板桩荷载传递机制,研究加固护岸板桩桩侧摩阻力的分布模式和大小。而对于新建板桩-原有护岸结构(老挡墙)共同组成的新型组合护岸结构研究较少,航道开挖对护岸结构和岸坡的影响机制尚不明确。

本文通过土工离心模型试验,研究航道开挖对新型组合护岸结构的影响,得出技术参数,以期为工程方案的优化设计提供技术支撑。

1 工程概况

1.1 基本情况

东宗线是国家高等级航道网的重要航道之一,承担着沟通长湖申线、湖嘉申线、京杭运河、杭申线、杭平线 5 条国家高等级航道的重要任务。工程起自南浔东迁,终于练市戴家村,航道整治

里程约 23.7 km,疏浚土方 250.15 万 m³,护岸工程 42.20 km(新建护岸 2.05 km,加固护岸 40.15 km)。

工程以湖嘉申线与京杭运河四家村航段为界,划分 3 个设计段:第 1 分段 K0+000—K9+600,长 9.6 km,护岸工程 18.97 km;第 2 分段 K9+600—K16+918,长 7.3 km,护岸工程 13.84 km;第 3 分段 K16+918—K23+670,长 6.8 km,护岸工程 9.4 km。

1.2 工程地质概况

航道沿线浅部主要分布杂填土、塘泥、粉质黏土、海积淤泥质粉质黏土,局部分布冲海积粉土、海积软塑粉质黏土等,对航道影响最大的是海积淤泥质粉质黏土及淤泥质粉质黏土,该层属高含水率、高压缩性、高灵敏度的软土,对岸坡的抗滑稳定、抗冲稳定、抗震稳定均存在不利影响,易发生滑坡、坍塌、垮塌崩岸等工程地质问题。

研究区域内主要分布有①₀¹塘泥、②₂层海积淤泥质粉质黏土、②₂¹层海积软塑粉质黏土、③₂层海积流塑淤泥质粉质黏土以及③₂¹层海积软塑粉质黏土。其中②₂层海积淤泥质粉质黏土连续分布,埋深 3.0 m、厚 15.5 m,局部相变为软塑粉质黏土或稍密状粉土;③₂层海积淤泥质粉质黏土厚度变化也较大,埋深 26.2 m、厚 7.6 m。地质剖面如图 1 所示。

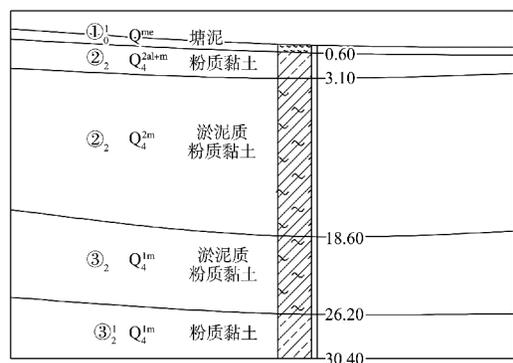


图 1 地质剖面 (单位: m)

1.3 加固护岸结构方案设计

对老挡墙进行加固,利用现有的浆砌块石挡墙,迎水面打设桩基,使其结构安全系数符合规

范，桩基踢脚稳定满足规范要求；再对老挡墙进行加固贴面，浇筑压顶，使其上部达到与传统混凝土重力式挡墙相同的使用效果，见图2。

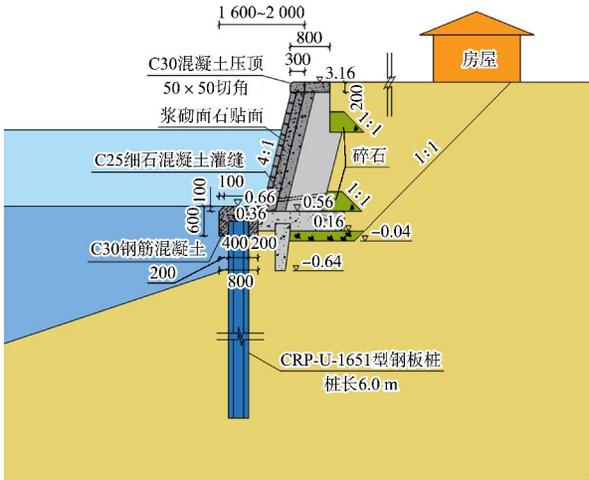


图2 加固方案剖面 (尺寸: mm; 高程: m)

设计航道单面宽不小于 30 m，最高通航水位 2.16 m，最低通航水位 0.56 ~ 0.46 m。桩型为 CRP-U-1651 型钢板桩^[7]，桩长 L 为 6 m，桩顶为厚度 0.6 m 的 C30 钢筋混凝土帽梁，帽梁以上对原护岸采用浆砌面石结构进行坡面修复，并重新浇筑压顶。

2 离心模型试验

2.1 试验设备及装置

试验在交通运输部天津水运工程科学研究所的 TK-C500 大型土工离心机^[8-9]上进行(图3)，离心机有效容量为 $500g \cdot t$ ，有效半径为 5 m，最大加速度为 $250g$ ，最大负载 5 t。配备 128 通道数据采集系统，单通道采样率不小于 3 000 次/s，此外还配备适用于高离心加速度的照相、摄像、位移、应力、应变等传感器量测系统。排液装置主要由水囊、气控阀、储液罐、管路、液位管等部件组成(图4)，试验中通过排放重液的方式模拟航道分层开挖过程，试验前根据所需排液的体积确定储液罐的大小和管路的长短，试验中通过气控阀控制管路的通断完成排液模拟。

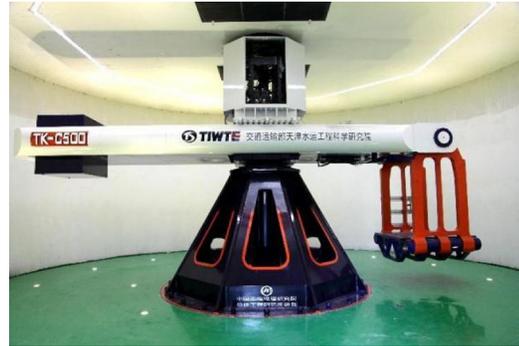


图3 TK-C500 型土工离心机

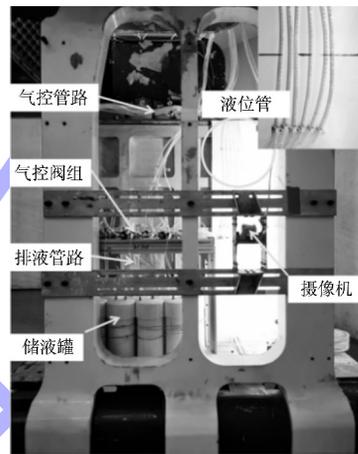


图4 离心试验装置

2.2 试验方案

试验离心加速度 $40g$ ，模型和原型参数之比为 1:40，模型试验布置见图5，传感器布置见图6。

根据抗弯刚度换算准则，模型钢板桩采用 0.25 mm 厚的不锈钢板冲压制作，桩长 150 mm (对应原型桩长 6 m)，并将钢板桩间的止口进行简化；老挡墙结构使用混凝土材料进行缩尺制作。

试验模拟区域主要土层为②₁ 粉质黏土和②₂ 淤泥质黏土。表1为场地主要土体物理力学参数。

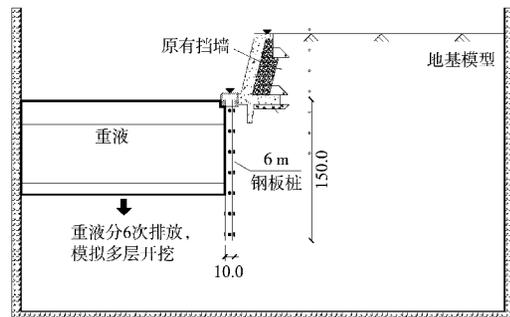


图5 模型试验布置 (单位: mm)

表 1 主要土体物理力学参数

土层	厚度/m	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
② ₁ 粉质黏土	2.0	33.2	1.89	4.92	27.0	15.3
② ₂ 淤泥质黏土	15.5	35.0	1.85	2.83	17.0	12.5

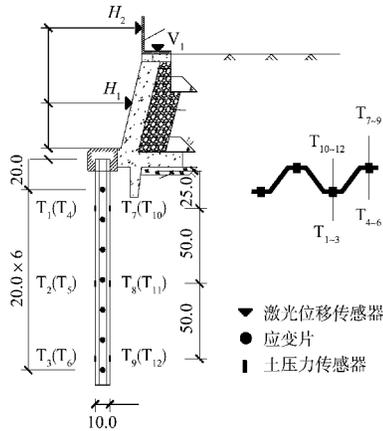


图 6 传感器布置 (单位: mm)

开挖区域的土体采用与淤泥质黏土等密度的 ZnCl_2 重液代替, 试验过程中分 6 次排放重液, 模拟航道开挖疏浚施工过程^[10-11]。前 2 次排液高度 25 mm, 之后每次排液高度 12.5 mm, 共开挖 6 次, 最大开挖深度 100 mm(对应原型开挖深度 4 m)。

试验中在板桩临水侧、背水侧的凹槽、凸起部分各布置 1 列土压力传感器, 土压力传感器竖向间距 50 mm, 应变片竖向间距 20 mm, 在老挡墙中部(距桩顶 1.2 m)、顶部(距桩顶 2.5 m)各布置 1 个水平位移传感器, 老挡墙顶部布置 1 个竖向位移传感器。

试验时, 离心加速度从 1g 开始逐渐增加至 40g, 待模型变形稳定后, 通过远程控制系统向气控阀 1 发送开关指令, 待 1 号储液罐完全灌满且液位管中的液面到达指定高度时, 第 1 阶段开挖结束。待变形稳定后, 逐步完成第 2~6 阶段的开挖过程。当钢板桩模型不再变形时, 试验结束。

3 试验结果及分析

3.1 土压力变化

离心模型试验结果均换算为原型尺寸。图 7 为土压力值随开挖深度变化曲线。整体上看, 试

验中各个监测点大部分土压力随开挖深度增大而减小(包括部分被动区域土压力)。由于试验中受监测点布置限制, 桩端土压力不易监测, 实际上桩端土压力变化剧烈, 开挖过程中靠岸侧(主动侧)桩端水平土压力增大, 临水侧(被动侧)桩端水平土压力减小。T₃(临水侧最下一排土压力传感器, 板桩外凸部分)土压力值随开挖深度增大而增大, T₁₂(靠岸侧最下一排土压力传感器, 板桩外凸部分)土压力值随开挖深度增大基本保持不变。分析可知, 钢板桩的转动点位于 T₃ 和桩端之间。临水侧 T₆ 处于开挖面以下的被动区域, 试验中呈减小状态, T₁₂ 位于板桩靠岸侧下部的主动区域, 试验中基本保持不变。由于是 U 形板桩, T₆ 处于板桩临水侧内凹部分, T₁₂ 处于板桩靠岸侧内凹部分, 表明板桩形状对土压力分布会造成较大影响。

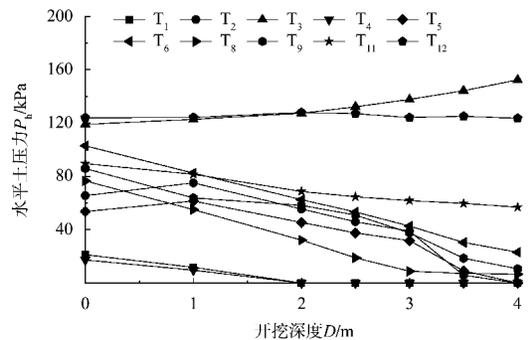


图 7 土压力值随开挖深度变化

开挖过程中板桩除了会产生绕底转动, 还会产生平移。板桩土压力除了与土体强度、开挖及位移状态等因素有关外, 还与板桩形状有关, 其对板桩土压力的影响机理如图 8 所示。将 U 形土块看作土拱, 临水侧内凹部分的土体位于拱顶、外凸部分的土体位于拱脚, 开挖后拱顶位移小于拱脚位移, 因此水侧外凸部分的土压力大于内凹部分的土压力。类似于边坡抗滑桩(相当于拱脚), 提供较大的水平土压力, 抗滑桩桩间土无需支撑

即可基本保持稳定，其水平向土压力较小，故开挖后临水侧外凸部分的土体位移大于内凹部分的土体位移。当板桩产生向水侧位移后，板桩斜截面部分摩擦土体，使临水侧拱脚处土压力进一步增大、拱顶处土压力进一步减小。相应地，靠岸侧内凹部分土压力大于外凸部分土压力。

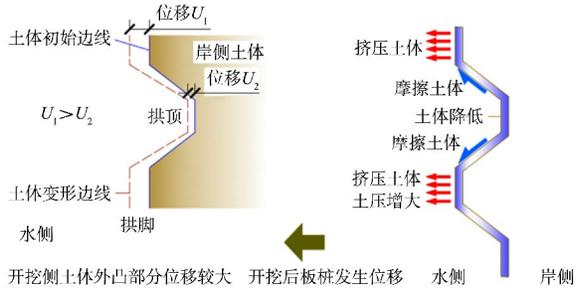


图 8 板桩形状对板桩土压力影响机理

3.2 位移变化

老挡墙水平和竖向位移随开挖深度变化如图 9 所示。当开挖深度小于 3.6 m 时，老挡墙位移相对较小且缓慢增加；当开挖至 3.6 m 后老挡墙中部水平位移、顶部水平和竖向位移开始突增，表明老挡墙开始失稳，6 m 板桩的极限开挖深度约为 3.6 m。对比 2 个水平位移传感器数据可以看出，在航道的不断开挖过程中，老挡墙呈现向水侧移动且向后翻转的趋势。同时，使用粒子图像测速 (partical image velocimetry, PIV) 技术^[12]对试验中采集的图像进行分析，得出开挖 3.6 m 时钢板桩的位移云图 (图 10)，从图中可以看出，相较于起始时刻 (未开挖)，钢板桩顶部帽梁的水平位移为 0.069 m (模型为 1.738 mm)。

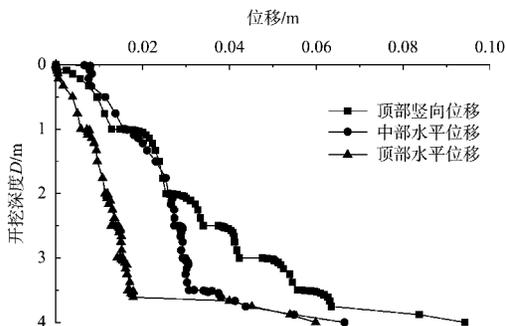


图 9 老挡墙位移随开挖深度的变化

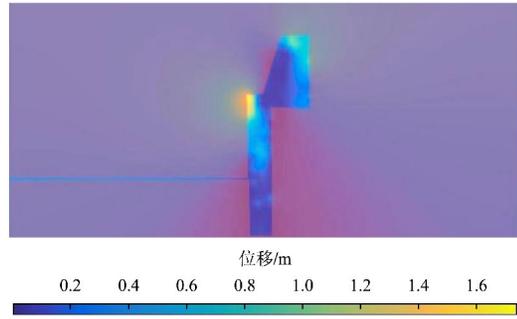


图 10 基于 PIVLab 图像分析的位移云图

3.3 钢板桩弯矩变化

离心模型试验中桩身弯矩沿深度变化见图 11。从图中可以看出，不同开挖深度条件下，桩身最大弯矩基本上出现在距离桩顶 4.0~4.5 m 范围内；随着开挖深度增加，板桩下部的弯矩呈现逐渐增加的趋势；开挖 1 m 后桩身最大弯矩约为 4.5 kN·m，开挖 2 m 后桩身最大弯矩突增至 8.3 kN·m，而后基本保持不变。开挖过程带来的板桩弯矩变化远小于 CRP-U-1651 型钢板桩的极限弯矩，板桩本身不会发生破坏。

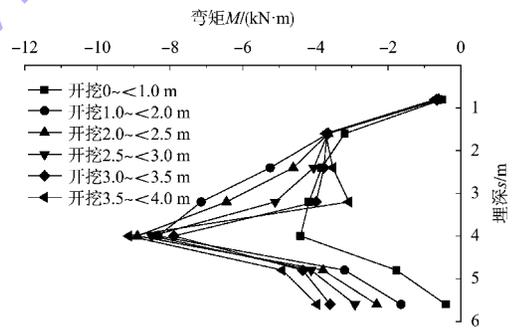


图 11 不同开挖深度条件下桩身弯矩分布

3.4 数值模拟结果对比

3.4.1 模型建立

通过 Abaqus 有限元程序对离心试验结果进行模拟计算，建模范围与离心试验模型保持一致，见图 12。土体模型上层为黏土，下层为砂土垫层，土体与板桩、土体与老挡墙、老挡墙与帽梁之间建立硬接触，板桩顶部嵌入帽梁部分与帽梁之间绑定。对土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型，所需要的土体参数 (弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力) 与模型试验保持一致。

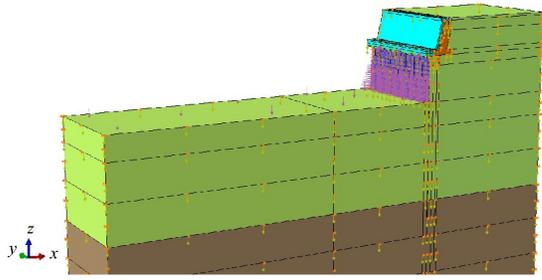


图 12 离心模型试验的数值模型

模型土体 4 个侧面约束相应的法向位移, 底面约束 x 、 y 、 z 3 个方向的位移。对整个模型施加 $40g$ 的重力加速度。将重液在开挖后土体表面上产生的静水压力用荷载代替(静水压力荷载 $p = \rho g' h$, 其中 $\rho = 1.85 \text{ g/cm}^3$, $g' = 40g$, h 为排液高度), 当开挖时(排液)调整土体表面静水压力荷载的大小使其与排液后剩余重液产生的静水压力大小相等, 直至排液完成。

3.4.2 试验结果与计算结果对比

图 13 为离心模型试验和数值模拟计算结果对比。从图中可以看出, 数值模拟与离心模型试验中的老挡墙竖向位移和 T_z 传感器监测数据基本一致, 验证了数值模拟计算模型中各参数的合理性。

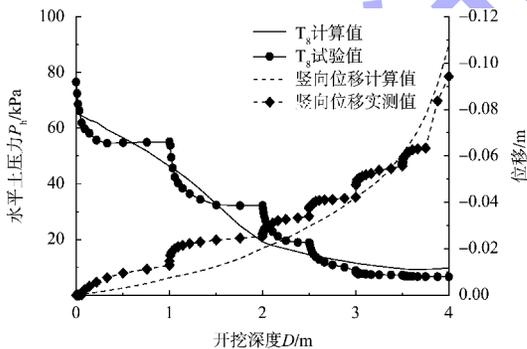


图 13 离心模型试验和数值模拟计算结果对比

试验还针对 8 m 和 10 m 桩长的工况开展模拟研究, 对比不同桩长条件下帽梁梁顶水平位移随开挖深度的变化。图 14 为不同桩长条件下梁顶水平位移随 D/L 的变化曲线, 从图中可以看出, 对于 6 m 板桩, 当 $D/L = 0.58$ 时基本达到极限开挖深度; 对于 8 m 板桩, 当 $D/L = 0.54$ 时基本达到极限开挖深度; 对于 10 m 板桩, 当 $D/L = 0.51$ 时基本达到极限开挖深度。因此, 对于 3 种桩长的板桩, 其极限开挖深度约为 0.5~0.6 倍桩长, 而

且随着桩长增加, 极限开挖深度逐渐降低, 主要因为随着桩长增加, 其抵抗弯曲变形的能力逐渐降低。

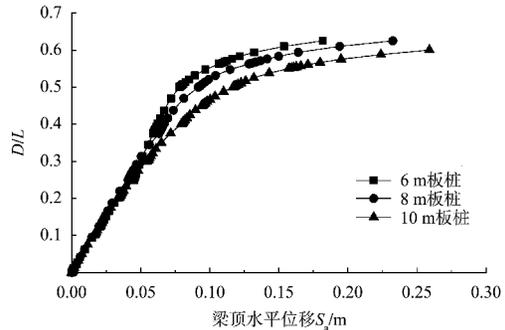


图 14 不同桩长条件下梁顶水平位移随 D/L 的变化

4 结论

1) 设计方案的极限开挖深度约为 3.6 m, 此时对应的老挡墙中部水平位移为 0.038 m、顶部水平位移为 0.017 m、竖向位移为 0.062 m, 钢板桩顶部帽梁的水平位移为 0.069 m。

2) 板桩形状对土压力分布产生影响。开挖后临水侧外凸部分的土体位移大于内凹部分的土体位移, 水侧外凸部分的土压力大于内凹部分的土压力。当板桩产生向水侧的位移后, 板桩斜截面部分摩擦土体, 使临水侧拱脚处土压力进一步增大、拱顶处土压力进一步减小。相应地, 靠岸侧内凹部分土压力大于外凸部分土压力。

3) 对于 3 种桩长的板桩, 其极限开挖深度约为 0.5~0.6 倍桩长, 而且随着桩长增加, 极限开挖深度逐渐降低。

参考文献:

[1] 中国科学院自然科学史研究所. 中国古代建筑技术史[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
 [2] 蒋永明, 陈志强, 钱惠军. 预制混凝土板桩在内河航道中的应用研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(12): 359-360.
 [3] 莫倩倩, 高磊, 陈永辉, 等. 垂直护岸板桩桩身变形数值模拟研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(2): 11-15.
 [4] 张建强, 卜一峰, 李若华. 垂直护岸板桩受力及变形特性现场试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(9):

166-170, 175.

[5] 索红义, 周鲁平. 运河钢板桩护岸经济性分析[J]. 科技信息, 2013(9): 363.

[6] 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.

[7] 南京万汇新材料科技有限公司. 冷弯钢板桩: GB/T 29654—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[8] 李建东, 张宇亭, 裴文斌. 土工离心机水平垂直双向振动台[J]. 水道港口, 2020, 41(1): 107-112.

[9] 金大龙, 袁大军, 韦家昕, 等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40

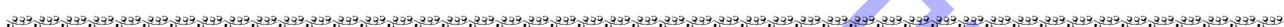
(8): 1507-1514.

[10] 陈仁朋, 刘书伦, 孟凡衍, 等. 软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1132-1138.

[11] 魏少伟. 基坑开挖对坑底已建隧道影响的数值与离心试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

[12] THIELICKE W, STAMHUIS E. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB [J]. Journal of open research software, 2014, 2(1): 30.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 225 页)

[14] 周波, 张可能, 杨庆光, 等. 南沙深厚软土真空预压法的现场试验与应用研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, 23(1): 60-65.

[15] 周森, 王晨曦, 潘健, 等. 真空-堆载联合预压处理滨海深厚软土地基的特性分析[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 296-302.

[16] 张世民, 何瑜琳. 堆载预压和真空堆载联合预压的比较[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(S2): 74-78.

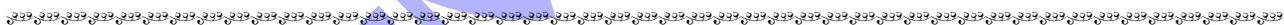
[17] 罗建平, 余立志, 李斌, 等. 直排直连真空联合水袋预

压法在软基处理中的创新性应用[J]. 水运工程, 2023(4): 180-184, 190.

[18] 孙立强. 超软吹填土地基真空预压理论及模型试验的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

[19] BHOSLE S, DESHMUKH V. Experimental studies on soft marine clay under combined vacuum and surcharge preloading with PVD [J]. International journal of geotechnical engineering, 2021, 15(4/6): 461-470.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 231 页)

[17] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[18] ARONI H S, JAVANKHOSHEL S, PAYAN, M, et al. Pseudo-static internal stability analysis of geosynthetic-reinforced earth slopes using horizontal slices method[J]. Geomechanics and geoengineering, 2022, 17(5): 1417-1442.

[19] 陈柏吉, 肖世国. 考虑条间剪力的刚性挡墙静力与地震主动土压力水平条分法[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2263-2276.

[20] 彭俊国, 朱彦鹏. 刚性挡土墙粘性填土被动土压力简化计算[J]. 工程力学, 2022, 39(5): 204-209, 223.

[21] 邓东平, 李亮. 水平条分法下边坡稳定性分析与计算方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3179-3188.

[22] 贺林林, 钱进, 赵陈雨, 等. 巫山神女峰机场高填方边坡稳定性分析方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(5): 646-651, 703.

[23] 刘雪艳. 边坡稳定分析方法在工程中的应用[J]. 科技与创新, 2023(16): 163-165, 169.

[24] 向云龙, 符文熹, 周洪福. 考虑地表径流拖曳力效应多层边坡稳定性分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(6): 145-150, 156.

(本文编辑 王璁)