

DOI: 10.11779/CJGE2024S10016

内河航道板桩-浆砌块石结构共同护岸机理研究

杨立功^{1,2}, 张宇亭^{*1,2}, 李建东^{1,2}, 赵跃^{1,2}, 吴文华³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456; 3. 湖州市港航管理中心, 浙江 湖州 313000)

摘要: 在内河高等级航道建设中, 新建板桩-原有浆砌块石共同护岸成为一种新型的护岸结构。通过对该护岸结构的离心模型试验研究, 分析了板桩与原有结构之间无连接(J1)、刚性连接(J2)时, 原有护岸结构位移、板桩侧土压力及桩身弯矩。试验结果表明, 刚性连接时, 原有结构后倾、下沉位移远小于无连接情况, 板桩稳定性大幅度提升; 开挖过程中J1、J2条件下板桩除了产生平移位移、还有转动位移, J1以转动为主, J2以平移为主; 受U型板桩形状影响, 开挖过程中板桩两侧土体形成土拱, 同一深度不同位置板桩土压力有较大区别, 土压力变化也有较大差异; 开挖过程中, J2条件下桩身范围内土压力变化较一致, J1条件下随桩身深度增加, 桩侧土压力变化幅度增加; J1条件下最大弯矩位于桩身下部、J2条件下位于桩身上部, 且J2最大弯矩大于J1最大弯矩。

关键词: 板桩; 浆砌块石; 护岸; 土压力; 土拱效应; 离心模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0222-06

作者简介: 杨立功(1982—), 男, 河南信阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事支护、护岸及边坡方面的研究。E-mail: 65481875@qq.com。

Bank protection mechanism of sheet pile-grouting block stone structure in inland waterways

YANG Ligong^{1,2}, ZHANG Yuting^{1,2}, LI Jiandong^{1,2}, ZHAO Yue^{1,2}, WU Wenhua³

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China; 2. National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China; 3. Huzhou Port and Shipping Management Center, Huzhou 313000, China)

Abstract: During the construction of high-grade channels in inland rivers, the new sheet piles and the original mortar block stone joint revetment have become a new revetment structure. The displacement of the original bank protection structures and the side earth pressure and the bending moment of the sheet piles are analyzed when there is no connection (J1) or rigid connection (J2) between the sheet piles and the original structures. The test results show that when the original structures are rigidly connected, the backward tilt and subsidence displacement are much smaller than those without connection, and the stability of the sheet piles is greatly improved. In the process of excavation under J1 and J2 conditions, there are translational and rotational displacements, while J1 is dominated by rotation, and J2 is dominated by translation. Influenced by the shape of the U-shaped sheet piles, soil arching is formed at both sides of the sheet piles during excavation, and the soil pressures on the sheet piles vary greatly at different positions at the same depth. In the process of excavation, the changes of the soil pressures in the range of the piles under J2 condition are consistent, and the variation range of the soil pressures at pile side increases with the increase of the pile depth under J1 condition. Under J1 condition, the maximum bending moment is located at the lower part of the piles, and under J2 condition, the maximum bending moment of J2 is greater than that of J1.

Key words: sheet pile; slurry block stone; revetment; earth pressure; soil arching effect; centrifugal model test

0 引言

随着中国内河航运的发展, 很多航道由中、低等级改造成高等级, 航道需要加宽、加深, 受制于土地因素, 航道等级提升无法拓宽、只能加深。加深过程中, 航道岸坡稳定性变得尤为突出, 传统中、低等级

航道所采用的浆砌块石护岸不能满足高等级航道岸坡稳定性需求, 因此需要改变加固方式, 如采用无锚板

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS20240401)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者: (Email: 125828612@qq.com)

桩加固（图 1）。由于板桩刚度大、施工便捷、防水效果好，作为护岸（或支护）结构已有大量应用^[1-3]。当板桩作为独立结构进行护岸或支护时，其稳定性较差，通常情况下板桩与其他结构组合使用，形成更为稳定的加固体系，因此，很多学者对不同组合形式下板桩工作机理开展了大量研究^[4-9]。如巨能攀等^[4]研究了堆积体上板桩墙桩土相互作用机理，蔡正银等^[5]研究了单锚板桩结构及分离卸荷式板桩结构的工作机理，Zhan 等^[6]研究了带卸荷平台的板桩结构受力机理，Kha 等^[7]、Zhao 等^[8]分别对砂土、淤泥质地基上的双排板桩工作性能进行了研究，Fal 等^[9]研究了基坑双锚板桩体系的受力与支护机制。

在内河航道升级过程中，由于航道开挖深度较小，只需新建板桩对已有浆砌块石护岸结构进行加固即可。王新泉等^[10]、Che 等^[11]研究了在原有护岸外侧打设新建板桩加固护岸的受力与变形机制。在原有护岸结构外侧打设新建板桩加固护岸，板桩与原有护岸类似于平行墙，原有护岸结构发生位移后侧向挤推板桩，这种情况会对板桩稳定性产生不利影响。因此，在最新的内河航道升级护岸加固中，将新建板桩置于原有护岸结构下方（图 1），新建板桩与原有护岸结构共同工作，形成更加稳定的加固体系。

对于这种新的加固形式，其对护岸加固机理不明确，因此，本文通过离心模型试验对该岸坡加固体系展开研究，进而揭示其协同加固机理。

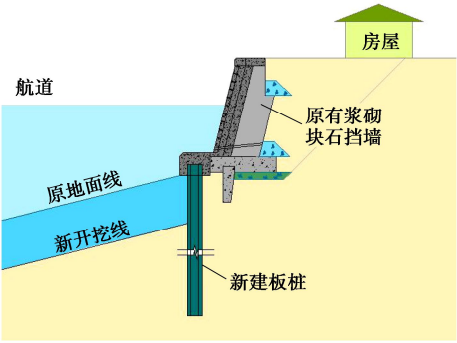


图 1 板桩-浆砌块石护岸

Fig. 1 Sheet pile-masonry revetment

1 离心模型试验方案

1.1 试验设计

试验依托浙江省东宗线四改三航道整治工程，某航段采用 CRP-U-1651 型钢板桩加固，桩长 8 m，航道挖深约 2~3 m，设计中将新建钢板桩布置在原有挡墙下部，板桩帽梁梁顶与原有挡墙墙角齐平。帽梁顶与岸上地面之间垂向距离 2.5 m，该范围内土体为杂填土层，帽梁顶向下 5 m 范围内为淤泥质土层、5 m

以下主要为粉质黏土层。

试验比尺为 1：40。模型土体采用重塑土，由于现场土质情况较差，原有挡墙墙后土体与墙前航道之间有较大高差，试验中板桩难以保持平衡（试验开挖模拟前板桩会产生较大位移），导致试验产生较大误差。因此，在试验中，提高土体强度，模型土体采用粉质黏土，其饱和密度 1.92 g/cm³，压缩模量 2.89 MPa，内摩擦角 15.1°，黏聚力 24.3 kPa。设计航道按 1：4 进行水下放坡开挖，试验中无法进行水下放坡开挖，因此采用排重液（重液密度 1.92 g/cm³）法模拟航道开挖（如图 2 所示，为得到极限状态下护岸结构失稳模式，试验中航道开挖 12.5 cm，相当于原型开挖 5 m）。

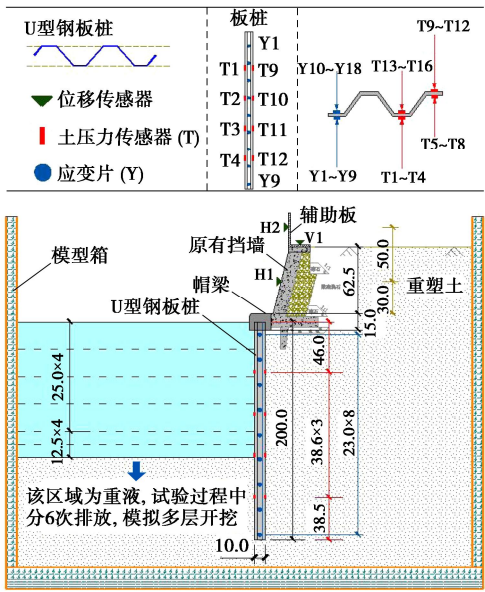


图 2 离心模型试验布置

Fig. 2 Arrangement of centrifugal model tests

1.2 模型制作

(1) 土体模型

试验选取现场粉质黏土重塑，初步制完土体模型后将其放入固结仪中在 1g 条件下进行固结，待达到固结度要求后上机进行超重力条件下土体固结。

(2) 板桩模型

原型结构为钢板桩，因此试验中仍采用钢材制作板桩，将原型缩尺 40 倍，模型板桩厚 0.25 mm、长 200 mm（图 3）。



图 3 板桩模型

Fig. 3 Model for sheet piles

（3）浆砌块石护岸结构模型

原型浆砌块石护岸结构为碎石、素混凝土板、浆砌块石等组合而成，试验中如采用原材料制作模型容易散掉，因此，模型材料采用石膏制作（图 4）。

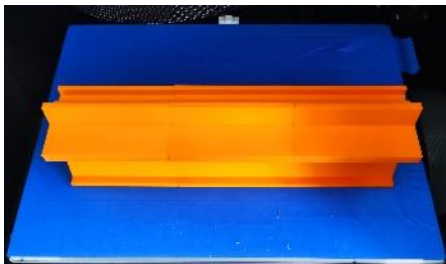


图 4 浆砌块石护岸结构模型
Fig. 4 Model for stone revetment

1.3 传感器布置

试验过程中对板桩两侧土压力、桩身应变及原有挡墙结构位移进行监测，传感器布置如图 2 所示。由于是 U 型板桩，在板桩凹槽、凸起部分分别布置桩身土压力、应变传感器（图 5）。帽梁与重液液面高差较小，不易在帽梁处布置位移传感器，因此在距离梁顶 30，80 mm 处分别布置两个激光位移传感器（图 6），同时在原有挡墙顶部布置一个竖向激光位移传感器。

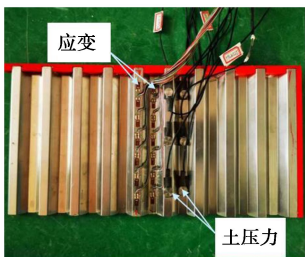


图 5 桩身传感器
Fig. 5 Sensors on pile

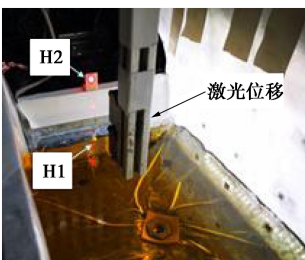


图 6 原有挡墙传感器
Fig. 6 Sensors on original retaining wall

1.4 模型组装

模型制作完成后，将模型进行组装，并将航道侧被开挖土体置换成重液（图 7）。

1.5 试验工况

为研究板桩与原有挡墙协同工作机理，试验分两

组：①帽梁与原有挡墙结构之间无连接（J1）；②帽梁与原有挡墙结构之间采用刚性连接（J2）。

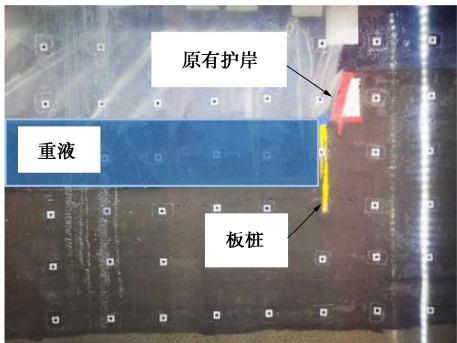


图 7 模型安装
Fig. 7 Installation of model

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

试验结果表明，开挖深度达到桩长 62.5%后，虽然新建板桩、原有挡墙产生了较大的水平位移、墙后土体产生较大沉降与开裂（图 8，J1），但板桩+原有结构整个护岸体系没有出现垮塌、倾覆状况，墙后土体也没有出现滑坡状况，整个护岸体系有较好的稳定性。

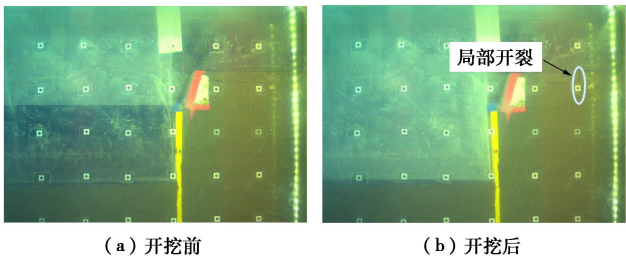


图 8 开挖前后试验对比

Fig. 8 Comparison of tests before and after excavation

2.2 结构位移

结构位移随开挖深度变化如图 9 所示。J1，J2 两种连接方式下，随开挖深度增加，结构位移增加，当刚性连接时，结构位移大幅度降低，板桩稳定性增强。开挖至 4 m 时，无连接时结构位移突增，板桩逐渐失稳，开挖至 5 m 时，无连接时结构水平位移达到 10~11 cm，刚性连接时结构水平位移只有 1~2 cm。另外，不同连接方式条件下，H1 点水平位移大于 H2 点水平位移，这表明在桩顶发生水平位移时，原有挡墙结构后倾，当无连接时，结构还有较大下沉。无连接时，原有挡墙后倾、下沉会进一步增大板桩土压力，导致板桩稳定性降低；刚性连接时，原有挡墙相对桩尖产生一个稳定力矩，进而增强板桩稳定性。

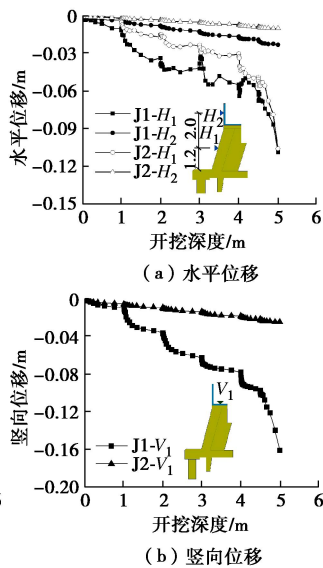


图9 结构位移随开挖深度变化

Fig. 9 Variation of structural displacement with excavation depth

2.3 板桩土压力

J1 板桩两侧土压力随开挖深度变化如图 10 所示。当开挖至 1.5~2.0 m 后, 开挖侧最上一排土压力计 T1, T5 监测值降为 0, 试验中土压力监测数值的变化与理论情况比较一致。开挖侧 T2, T6 埋深 3.38 m, 开挖 3.38 m 后, 其土压力值逐渐降为 0, 靠岸侧最上一排土压力计 T9, T13 (埋深 1.84 m) 随开挖深度增加 (约 4.5 m) 土压力也逐渐降为 0。

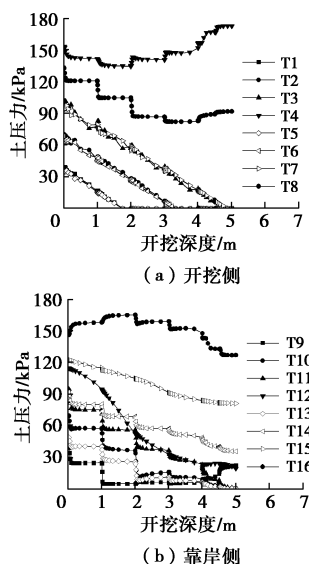


图 10 J1 土压力随开挖深度变化

Fig. 10 Variation of soil pressure of J1 with excavation depth

试验过程中 T4 土压力值随开挖深度增大而增大, T16 土压力值随开挖深度增大先增大后有所减小, 其余各监测点土压力均随开挖深度的增大而有不同程度的减小。T8 也处于开挖面以下的被动区域, 在试验中呈减小状态, 这表明, 板桩板桩形状对板桩土压力分布有较大影响。实际上, U 型板桩会产生拱效应, 在

T4 所在的位置相当于拱脚、T8 所在的位置相当于拱顶, 开挖过程中土压力逐渐从拱顶向拱脚转移。

另外, 随开挖深度增加, T16 土压力降低幅度较小, 并且呈先增大、后减小趋势。这表明在开挖过程中, 板桩不但有平移位移, 还有转动位移 (当板桩转动大于平移产生的位移时, 桩后土压增加), 而且转动中心逐渐下移。

J2 板桩两侧土压力随开挖深度变化如图 11 所示。当板桩与原有挡墙之间刚性连接时, 除 T16 外其余各测点土压力随开挖深度变化规律与 J1 大致相同。在刚性连接情况下, 板桩转动位移较小, 板桩土压力主要受板桩平移影响, 因此, 在 T16 点处板桩土压力大幅度降低。另外, J2 靠岸侧上部土压力大于无连接情况, 刚性连接时, 桩体转动位移大幅度降低, 桩、土之间不易脱离。

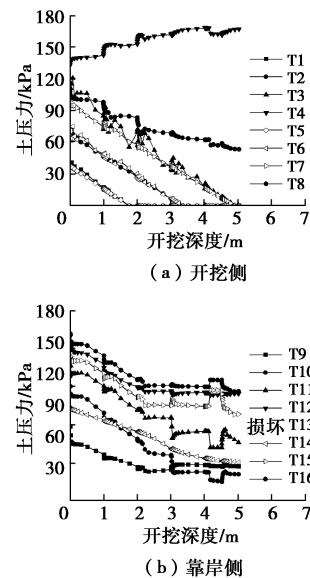


图 11 J2 土压力随开挖深度变化

Fig. 11 Variation of soil pressure of J2 with excavation depth

不同开挖深度条件下, J1 桩侧土压力沿桩身分布如图 12 所示 (图中深度指相对板桩桩顶的深度; 开挖后开挖侧土压力测点只剩一个, 因此选择靠岸侧进行分析)。靠岸侧板桩土压力随开挖深度增加而逐渐减小, 其中 T9~T12 测线土压力变化较大、且随桩身深度增加变化加剧 (上部测点土压力从 8.1 kPa 降至 5.2 kPa、降幅 2.9 kPa, 下部从 105.3 kPa 降至 9.5 kPa, 降幅 95.8 kPa), T13~T16 测线土压力变化相对较小、随桩身深度增加变化相对较小 (上部测点土压力从 29.3 kPa 降至 0 kPa、降幅 29.3 kPa, 下部从 160.5 kPa 降至 137.6 kPa, 降幅 22.9 kPa)。靠岸侧 T9~T12 所在的位置相当于拱顶、应力较小, T13~T16 相当于拱脚, 在拱脚土压力集中、应力较大。开挖过程中板桩产生较大位移, 拱顶土体自身变形较小、当板桩产

生位移后, 桩侧土压力大幅度降低, 而在拱脚处其应力值主要受板桩位移控制, 其土压力值变化相对较小。

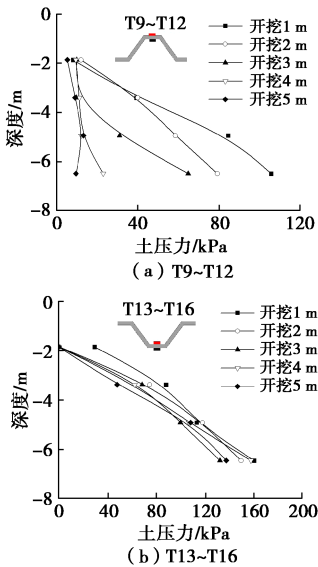


图 12 J1 桩身土压力分布

Fig. 12 Distribution of earth pressure on sheet pile of J1

不同开挖深度条件下, J2 桩侧土压力沿桩身分布如图 13 所示。当板桩与原有挡墙之间刚性连接时, 板桩主要产生平移位移、转动位移较小, 测线 T9~T12, T13~T16 土压力变化较均匀。

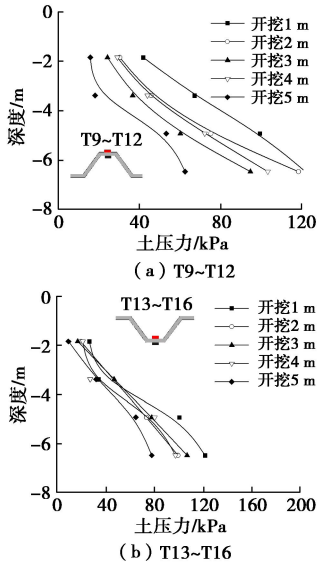


图 13 J2 桩身土压力分布

Fig. 13 Distribution of earth pressure on sheet pile of J2

J1 开挖至临界失稳状态时 (开挖至 4 m), J1, J2 桩侧土压力如图 14 所示。航道开挖至 4 m 时, J1 条件下板桩位移较大, 测线 T9~T12 与 T13~T16 土压力相差很大, 而 J2 条件下板桩位移较小, 测线 T9~T12 与 T13~T16 土压力相差较小。另外, J2 桩侧土压力在桩身上部大于 J1、在桩身中部及下部小于 J1 (T13~T16), 这表明 J1 产生了远大于 J2 的转动位移。

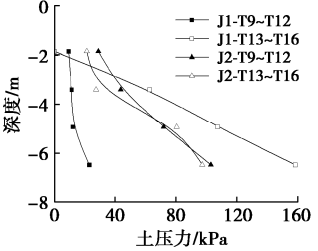


图 14 临界失稳状态下桩身土压力

Fig. 14 Soil pressures on piles under critical instability condition

2.4 桩身内力

不同开挖深度条件下, J1 桩身最大弯矩位置距离桩顶约 6 m 处, 随开挖深度增加, 桩身最大弯矩位置略有下移 (图 15 (a)); J2 桩身最大弯矩位置距离桩顶约 3 m 处 (图 15 (b))。开挖过程中, J1 最大弯矩从 5.6 kN/m 增至 28.0 kN/m (开挖至 4 m 时弯矩最大)、J2 最大弯矩在 42.1~59.0 kN/m 内变化 (开挖至 3 时弯矩最大)。J1 桩身最大弯矩位于桩身下部、J2 位于桩身上部, J2 最大弯矩值大于 J1 (图 16)。

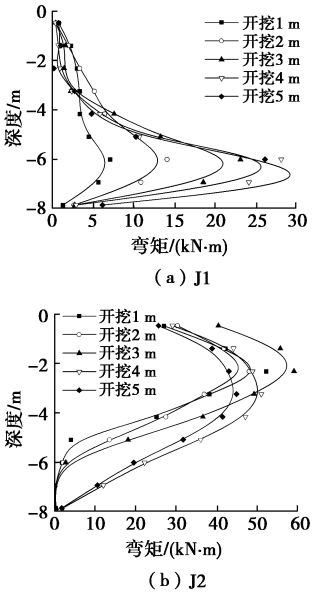


图 15 桩身弯矩

Fig. 15 Bending moments of piles

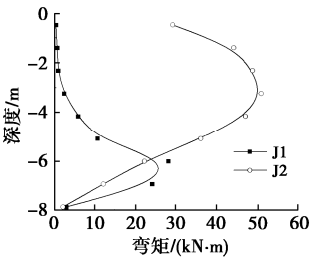


图 16 临界失稳状态下桩身弯矩

Fig. 16 Bending moments piles of under critical instability

3 结 论

通过对内河航道板桩-浆砌块石结构共同护岸机理的离心模型试验研究, 分析了新建板桩结构与原有

浆砌块石结构之间无连接(J1)、刚性连接(J2)条件下,原有护岸结构位移、板桩桩侧土压力及桩身弯矩,得到6点结论。

(1) J1、J2两种连接方式下,随开挖深度增加,结构位移增加,当刚性连接时,结构位移大幅度降低,板桩稳定性增强(本文研究中增强25%以上);在开挖过程中,原有挡墙结构后倾,当无连接时,原有挡墙结构还有较大下沉,原有挡墙后倾、下沉会进一步增大板桩位移,导致板桩稳定性降低。

(2) 试验结果表明,开挖过程中J1、J2条件下板桩除了产生平移位移、还有转动位移,J1以转动位移为主,J2以平移为主。

(3) 受U型板桩形状影响,开挖过程中板桩两侧土体会形成土拱效应,开挖侧外凸部分(T1~T4)大于内凹部分(T5~T8)土压力,靠岸侧外凸部分(T9~T12)小于内凹部分(T13~T16)土压力,且在靠岸侧T9~T12土压力变化幅度大于T13~T16。

(4) 开挖过程中,J2条件下板桩桩身范围内土压力变化较一致,J1条件下随桩身深度增加,桩侧土压力变化幅度增加,且最大变化值大于J2。

(5) J1条件下桩身最大弯矩位置距桩顶约6m处、J2条件下桩身最大弯矩位置距离桩顶约3m处,且J2桩身最大弯矩大于J1。

(6) J1条件下,原有浆砌块石护构的主要作用是挡土(浆砌块石结构后方土体),对板桩+浆砌块石整体护岸结构稳定性没有明显提升;J2条件下,原有浆砌块石护构除了挡土,还可以产生稳定力矩,对板桩+浆砌块石整体护岸结构稳定性有较大提升。

参考文献:

- [1] YOSHIKAKI Kusaba. Development of sheet-pile and rolling method in Japan[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Steel Rolling, Beijing, 2010.
- [2] UNDERWOOD C A, GREENLEE R M. Steel sheet pile used as permanent foundation and retention systems-design and construction[C]// Earth Retention Conference 3. Bellevue, Washington, 2010.
- [3] 沈旭鸿. 钢板桩在内河航道护岸工程中的应用[J]. 中国水运, 2021(10): 136-138. (SHEN Xuhong. Application of steel sheet pile in revetment engineering of inland waterway[J]. China Water Transport, 2021(10): 136-138. (in Chinese))
- [4] 巨能攀, 黄润秋, 涂国祥. 桩板墙桩土作用机理有限元分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(4): 365-370. (JU Nengpan, HUANG Runqiu, TU Guoxiang. The FEM study on interaction mechanism between the pile and the rock-soil of the sheet-pile wall[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(4): 365-370. (in Chinese))
- [5] 蔡正银, 侯伟. 单锚板桩结构的工作机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 29-34. (CAI Zhengyin, HOU Wei. Mechanism of sheet-pile structure with a single anchorage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 29-34. (in Chinese))
- [6] ZHANG M, WANG W, HU R H, et al. Study on model and tests of sheet pile wall with a relieving platform[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8894601.
- [7] KHAN M R A, TAKEMURA J, FUKUSHIMA H, et al. Behavior of double sheet pile wall cofferdam on sand observed in centrifuge tests[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2001, 1(4): 1-16.
- [8] ZHAO T C, DING W Q, WEI L X, et al. The behavior analysis of a cofferdam constructed by double sheet pile wall above muck[C]//Geo Shanghai International Conference. Singapore, 2018.
- [9] FALL M, GAO Z G, NDIAYE B C. Three-dimensional response of double anchored sheet pile walls subjected to excavation and construction sequence[J]. Heliyon, 2019, 5(3): e01348.
- [10] 王新泉, 陈永辉, 章宇强, 等. 板桩加固护岸受力机制的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1749-1756. (WANG Xinquan, CHEN Yonghui, ZHANG Yuqiang, et al. Field experimental study of stress mechanism of sheet pile reinforced revetment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1749-1756. (in Chinese))
- [11] CHEN L, DONG J Q, WANG F X, et al. Integration of a new sheet-pile wall and old gravity revetment - a stability study[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2019, 56(3): 210-216.

(编校: 胡海霞)