



带撑双排桩支护结构 在深厚软土基坑中的应用 *

陈品章，夏高响，夏伟，李华治

(安徽省交通勘察设计院有限公司，安徽 合肥 230011)

摘要：某船闸闸址下伏深厚软土，地质条件复杂，船闸基坑开挖深度较深。为满足支护结构和周边环境变形要求，兼顾船闸施工的经济性与安全性，拟在双排桩支护方案基础上增设 2 道装配式钢支撑。以装配式钢支撑与双排桩组合支护形式为研究重点，利用 GTS-NX 有限元软件，模拟船闸深基坑施工过程。监测数据和有限元分析结果表明：带撑双排桩支护结构水平位移特征、周边建筑物沉降特征与工程实测结果基本吻合。钢支撑可有效限制围护结构的水平位移，减少基坑开挖对周边环境的影响，用装配式 H 型钢支撑加固软土深基坑可行。

关键词：双排桩；基坑支护；装配式钢支撑；深厚软土；船闸

中图分类号：U641.5

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)08-0170-06

Application of supporting structure featuring prefabricated steel supports and double-row piles in deep soft soil foundation pits

CHEN Pinzhang, XIA Gaoxiang, XIA Wei, LI Huazhi

(Anhui Transport Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: Deep soft soil lies under the substratum of a ship lock, where the geological conditions are complex, and the excavation depth of the ship lock foundation pit is large. In order to meet the deformation requirements of the supporting structure and the surrounding environment and ensure the economy and safety of the ship lock construction, it is proposed to add two prefabricated steel supports into the double-row pile supporting scheme. This paper focuses on the combined support of prefabricated steel supports and double-row piles and uses the finite element software, namely GTS-NX to simulate the construction process of the deep foundation pit of the ship lock. The monitoring data and finite element analysis results show that the horizontal displacement characteristics of the supporting structure featuring prefabricated steel supports and double-row piles and the settlement characteristics of surrounding buildings are basically consistent with the measured results of the project. Steel support can effectively limit the horizontal displacement of the supporting structure and reduce the impact of pit excavation on the surrounding environment. Therefore, it is feasible to use prefabricated H-shaped steel supports to reinforce deep foundation pits in soft soil.

Keywords: double-row pile; foundation pit support; prefabricated steel support; deep soft soil; ship lock

软土具有强度低、含水率高、变形大、灵敏度高等不良工程特性，区域地质环境脆弱敏感，极大增加了软土区域工程建设难度^[1]。深厚软土

层地区基坑开挖会直接破坏周围土体的原应力平衡场，造成地表不均匀沉降，导致邻近建筑物倾斜或裂缝，对周边地面结构的安全构成威胁^[2]。

收稿日期：2022-10-12

*基金项目：安徽省交通运输重点科技项目（2021-KJQD-012）

作者简介：陈品章（1996—），男，硕士，助理工程师，从事基坑支护、生态护坡研究工作。

合理有效的支护方案是保证基坑工程在复杂环境下安全、顺利施工的关键^[3]。

基坑工程具有地域性, 不同区域基坑开挖引起的环境效应差异较大。船闸基坑一般开挖深度较大, 场地地质条件复杂。在土性较好、周边环境对变形控制要求不高时, 采用放坡结合多级平台, 悬臂桩支护形式即可满足工程需求^[4]; 但在深厚软土基坑或变形要求高的复杂环境下, 单一支撑形式难以满足工程要求, 为减少基坑开挖对周边环境的影响, 有效控制变形, 需采用挡土结构结合内支撑的组合支护形式^[5-7]。

安徽某船闸深基坑工程原采用双排桩进行基坑支护, 基坑开挖过程中发现支护桩水平位移过大, 闸首区域坡顶房屋及路面开裂, 双排桩单一支护形式无法满足基坑工程的要求。为满足围护结构自身强度及变形要求, 减少基坑开挖对周边环境的影响, 拟在双排桩支护基础上增设装配式钢支撑作为基坑加固方案。采用迈达斯 GTS-NX 软件, 对带撑双排桩支护形式下基坑开挖过程进行数值模拟, 并结合工程监测数据对比分析, 揭示基坑开挖对围护结构和邻近建筑物的影响, 得出该支护结构的水平位移和邻近浅基础建筑的位移变化特征, 旨在为类

似基坑工程的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 基坑工程及周边环境

拟建船闸基坑呈长条形, 长约 425 m, 阁室段底宽约 34 m, 阁首段底宽约 59 m, 基坑深度为 15.00~19.30 m。船闸基础坐落于淤泥层中(厚约 16~21 m)。基坑周边环境较复杂, 基坑南侧为防洪河堤道路; 基坑北侧坡顶分布有较多民房, 多为 2 层浅基础建筑物, 结构整体性较差, 围护桩与民房最小净距约为 15.0 m。

1.2 工程地质与水文条件

拟建船闸位置为河床及滩地, 根据地勘报告, 场地内地基岩土构成从上至下依次为: ①层杂填土; ③层淤泥质粉质黏土, 呈流塑状态, 局部为软塑状态; ④₂ 层粉质黏土; ⑦层圆砾; ⑧₁ 层强风化砂岩; ⑧₂ 层中风化砂岩未揭穿, 揭露最大厚度为 14.80 m。各土层物理力学参数见表 1。

场地内地下水以潜水分布为主, 局部为上层滞水, 深层为微承压水, 主要富存于③层淤泥质粉质黏土中。场地地下水埋深为 0.50~4.70 m, 水位高程为 4.11~9.24 m。

表 1 土层主要物理力学参数

土层名称	层厚/m	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	泊松比 ν	孔隙比 e
①杂填土	0.4~4.3	1.75	3.5	9.0	3.0	0.38	0.80
③淤泥质粉质黏土	11.0~18.4	1.79	3.4	7.6	6.4	0.35	1.02
④ ₂ 粉质黏土	0.8~8.9	1.86	4.6	21.3	7.8	0.30	0.79
⑦圆砾	0.7~2.8	2.10	21.0	0.0	36.0	0.30	0.72
⑧ ₁ 强风化砂岩	0.7~3.9	2.13	21.3	12.0	40.0	0.23	0.61
⑧ ₂ 中风化砂岩	-	2.20	22.0	10.0	45.0	0.13	0.33

2 基坑支护方案

工程原设计采用双排桩加上部放坡支护形式, 根据两侧边界条件的差异, 不同部位采用不同的桩径、桩距和排距。两排支护桩之间采用水泥土双向搅拌桩进行桩间土加固及堵漏, 桩前被动区软土采用两排水泥土双向搅拌桩咬合加固。

基坑开挖过程中发现闸首区域坡顶房屋及路面开裂; 支护桩水平位移过大, 远超基坑变

形预警值, 紧急采取土方回填措施, 回填至大范围开挖高程后变形渐趋稳定。鉴于基坑支护结构安全对整个工程影响较大, 为兼顾船闸工程的施工进度和经济效益, 采用装配式钢支撑加固闸首段基坑, 并对加固后的基坑稳定性进行了复核。

装配式钢支撑采用 400 mm×400 mm×13 mm×21 mm(高度×宽度×腹板厚度×翼缘板厚度) H 型

钢, 阀首位置布设 2 道临时钢支撑, 支撑沿基坑纵向间距为 5.0 m, 沿支撑方向布置 4 排立柱, 钢

支撑主受力构件通过拼装方式连接, 加固后基坑支护剖面见图 1。

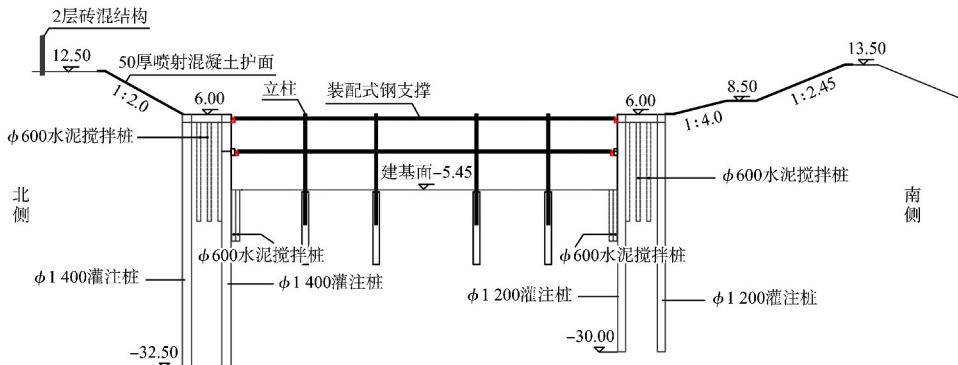


图 1 基坑支护剖面 (尺寸: mm; 高程: m)

3 基坑开挖有限元模拟

结合某基坑实体工程, 采用 GTS-NX 有限元软件进行模拟分析。其中岩体及建筑物采用平面应变单元模拟; 双排桩、连梁、钢支撑、立柱等采用弹性模型和梁单元模拟; 土体采用修正莫尔-库仑模型, 并对物理力学参数相近的土层进行合并处理^[8]。基坑实际宽度为 59 m, 开挖深度为 11.45 m, 为兼顾计算精度和效率, 模型尺寸取 240 m(长)×75 m(高), 有限元模型见图 2。

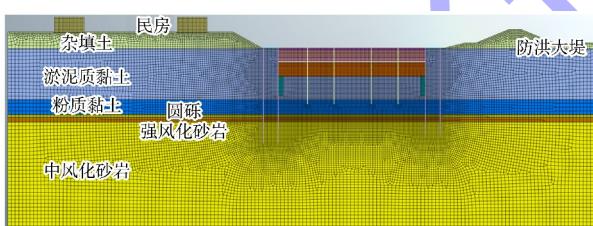


图 2 基坑支护有限元模型

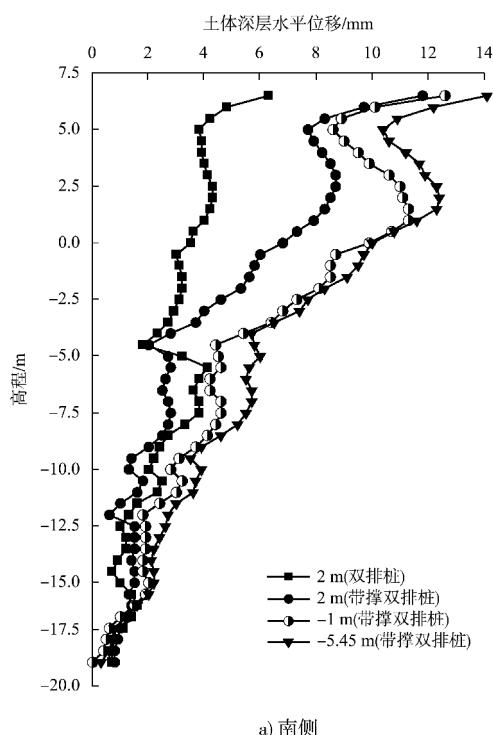
根据阀首基坑开挖实际施工过程, 有限元计算模型共设置 7 个工况包括: 1) 场地初始应力分析; 2) 施作支护桩、连冠梁、立柱等; 3) 首次开挖至 2.00 m 高程; 4) 施工第一道钢支撑; 5) 二次开挖至高程为 -1.00 m; 6) 施工第二道钢支撑; 7) 三次开挖至建基面高程 -5.45 m。

4 数值计算结果

4.1 土体深层水平位移

闸首段基坑支护后侧土体南、北侧各布设 1 根测斜管, 对土体深层水平位移进行持续监测。

由图 3 可知, 双排桩支护方案下基坑开挖到高程 2.00 m 时, 南、北侧土体最大水平位移分别为 6.5、18.3 mm。因软土具有流变特性, 测斜管自基坑回填完成后至支撑系统安装完成前均发生了一段整体位移。带撑双排桩支护方案下基坑开挖到相同高程时, 南、北侧土体最大水平位移增加量分别为 1.4、2.6 mm, 土体深层水平位移增速明显放缓。钢支撑系统安装完成后至开挖到建基面, 3 条带撑双排桩曲线数值增幅较小, 变形趋于稳定, 说明钢支撑系统有效限制了土体深层水平位移的发展。



a) 南侧

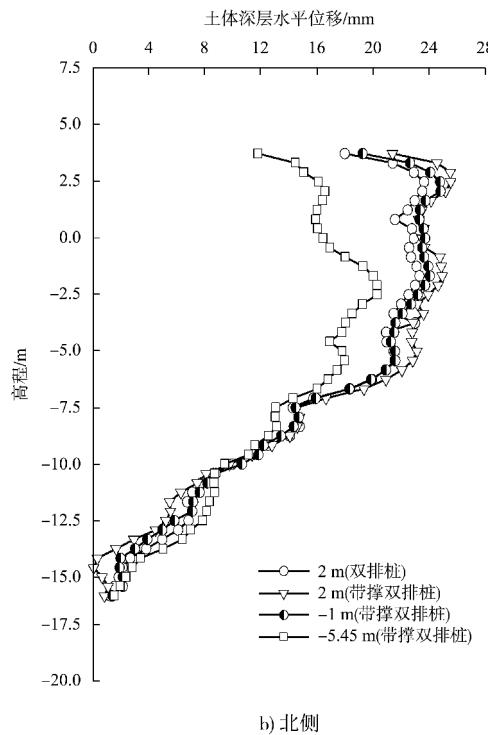


图3 土体深层水平位移

4.2 连梁水平位移

闸首段基坑两侧连冠梁顶部各布置2个水平位移监测点, 南侧为ZD1-45、ZD1-46, 北侧为ZD2-38、ZD2-39。基坑回填完成后其水平位移仍不断发展, 截至支撑系统安装完成前, 北侧、南侧水平位移最大增加了43.5、17.8 mm。支撑系统安装完成后至开挖到建基面, 北侧、南侧水平位移增加了24.8、8.4 mm。累计总位移北侧68.3 mm、南侧26.2 mm。开挖至基坑建基面时, 连梁水平位移增幅最大, 北侧增加了13.8 mm, 占最大水平位移的68.7%; 南侧增加了5.1 mm, 占最大水平位移的64.6%, 说明双排桩支护结构连梁水平位移对开挖深度比较敏感, 开挖深度越大, 其最大水平位移增幅越大。对比带撑双排桩开挖工况下监测值和GTS-NX计算值, 较为接近, 见图4。

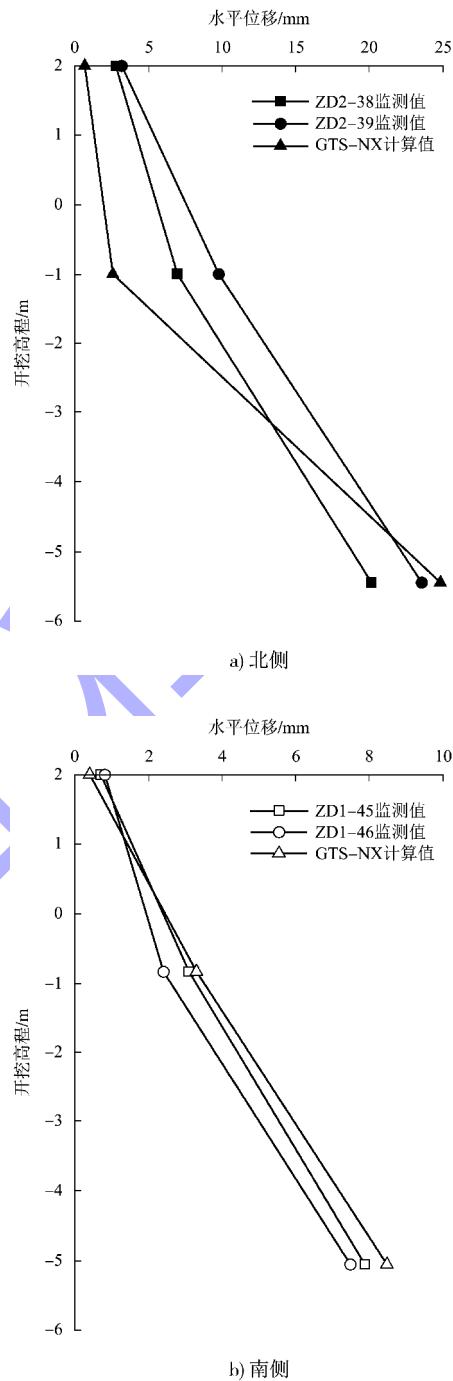


图4 连冠梁顶部水平位移对比

4.3 基坑北侧地表与建筑物沉降

闸首段北侧分布较多民房, 多为2层浅基础建筑物, 结构完整性较差, 围护桩与民房最小净

距约为 15.0 m, 因距离太近, 采用一级放坡加双排桩的支护方案。基坑开挖过程中发现支护桩水平位移过大, 北侧多处房屋开裂, 地面顺基坑方向出现贯穿裂缝。

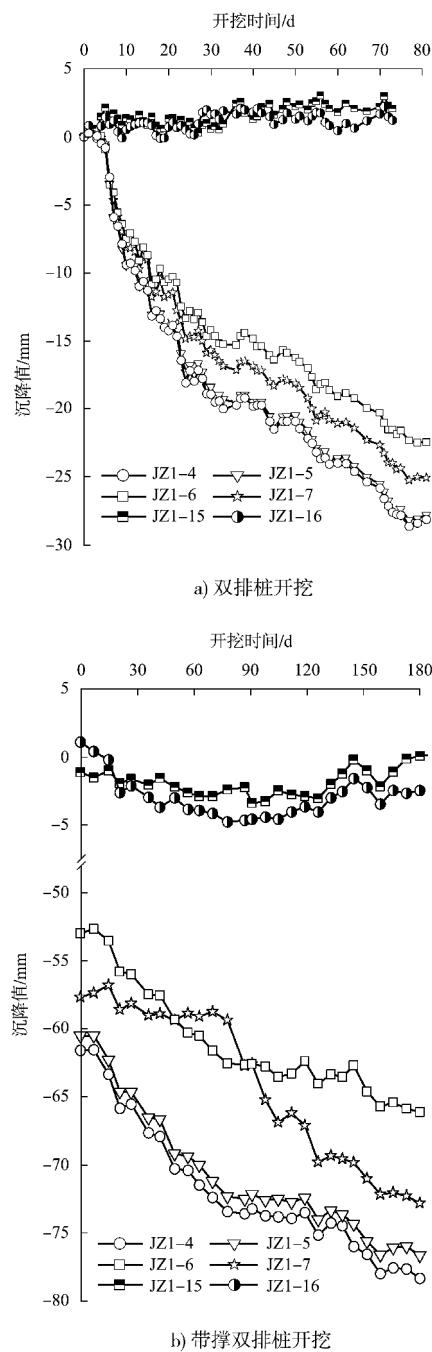


图 5 邻近建筑物沉降量历时曲线

基坑北侧建筑物沉降观测点 JZ1-4、JZ1-5、JZ1-6、JZ1-7 距离基坑围护桩约 30 m, JZ1-15、

JZ1-16 距离基坑围护桩约 80 m, 其中 JZ1-4、JZ1-5 的沉降量较大, 沉降最大点 JZ1-4 为 78.4 mm。近开挖面两个连续的监测点最大沉降差值为 12.4 mm, 测点 JZ1-15、JZ1-16 的沉降较小, 最大沉降量约 4 mm, 说明基坑开挖对周边环境影响范围达到 70.0 ~ 80.0 m, 为基坑开挖深度的 6~7 倍, 明显大于经验值, 浅基础建筑更易受基坑开挖影响, 变形量明显高于其它基础类型, 这与相关学者^[9-10]关于软土地区基坑开挖引发的扰动规律基本一致。

由图 5 可知, 10 d 前各测点的曲线近似呈水平状, 说明建筑物在基坑土体开挖初期受扰动较小, 沉降不明显。随土方开挖速度加快, 支护结构及外侧土体变形加大, 近开挖面建筑物沉降加速, 而远开挖面沉降波动则较小; 双排桩支护方案下进行基坑开挖, 距离较近的浅基础建筑物沉降速率约为带撑双排桩支护形式的 3~5 倍。根据观测结果, 双排桩支护方案下基坑深度仅开挖一半, 邻近建筑物累计沉降量高达 30.0 mm, 但支撑系统安装完成后至开挖到建基面, 邻近建筑物最大累计沉降量为 17.0 mm, 地表沉降最大累计值为 25.0 mm 左右。说明仅采用双排桩支护不能有效控制软土深基坑开挖对周围土体的扰动, 在双排桩内部增加 2 道装配式钢支撑可有效保障临近建筑物的安全。

北侧地表竖向位移有限元云图见图 6, 基坑开挖完毕, 邻近民房产生竖向沉降, 沉降量最大值为 28.5 mm, 与实测结果相比, 其位移趋势基本一致, 数值上在同一个数量级, 有限元结果略大, 在实际情况中, 建筑物沉降变形除受邻近基坑开挖卸荷影响, 还可能与房屋荷载等因素有关。地表沉降影响范围高于经验值, 距基坑近 4 倍坑深的地表沉降值为 5.3 mm。

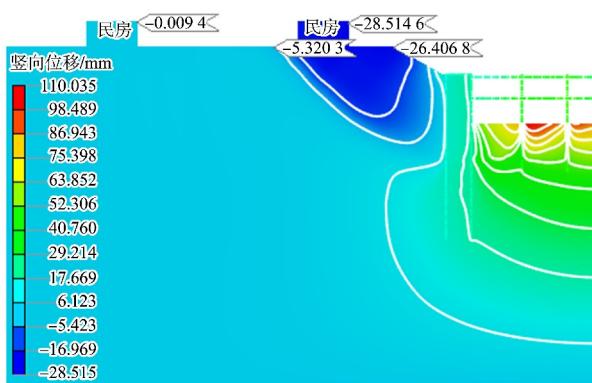


图 6 基坑竖向位移云图

5 结论

1) 本船闸闸基下伏深厚软土, 基坑开挖最深区段为 11.45 m, 闸首基坑开挖过程中造成支护桩桩顶位移过大, 周边民房开裂、地表大范围沉降。在深厚软土基坑或变形要求高的复杂环境下, 双排桩支护形式难以满足工程要求, 为减少基坑开挖对周边环境的影响, 宜采用挡土结构结合内支撑的组合支护形式。

2) 软土地区基坑开挖的影响范围明显大于经验值, 约为基坑开挖深度的 6~7 倍; 浅基础建筑物更易产生不均匀沉降, 导致建筑物开裂, 应充分重视该区域基坑开挖对临近浅基础建筑结构安全的影响。

3) 支护方案改为带撑双排桩结构后, 增设的钢支撑系统可有效控制闸首基坑围护结构的水平位移, 减少基坑开挖对周边环境的影响, 保证基坑建设期的安全稳定, 并取得了较好的经济效益。

(上接第 89 页)

- [4] 尹晔, 王党伟, 冯胜航, 等. 向家坝水电站库区泥沙淤积特性[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 71-75.
- [5] 宋向阳, 吴发启. 几种插值方法在微 DEM 构建中的应用[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 45-50.
- [6] 吴敬文, 周丰年, 赵辉. 基于格网节点的土方量计算方法研究[J]. 测绘通报, 2006(11): 43-45, 57.
- [7] 靳国栋, 刘衍聰, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 53-57.

参考文献:

- [1] 张玉成, 杨光华, 钟志辉, 等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2334-2343.
- [2] 蔡建军, 谢璇, 李树忱, 等. 复杂条件下深基坑多层支护方法及数值模拟研究[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 188-194.
- [3] 庄海洋, 吴祥祖, 瞿英军. 深软场地地铁车站深基坑开挖变形实测分析[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(5): 86-91.
- [4] 孙昌兴, 蔡敏. 装配式钢支撑在淤泥质土船闸深基坑中应用探究[J]. 安徽建筑, 2021, 28(2): 116, 135.
- [5] 周勇, 朱乔红, 朱彦鹏, 等.“一桩两用”新型支护结构在某深基坑支护中的应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 3168-3177.
- [6] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 多种支护型式在超大深基坑工程设计中的组合应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 198-204.
- [7] 汪海生, 陶言祺. 装配式 H 型钢支撑在超深厚软土基坑中的应用[J]. 水运工程, 2020(11): 161-165.
- [8] 罗翔, 永新, 曾理菁, 等. 带撑双排地下连续墙支护结构在清远枢纽航道扩容工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 215-219.
- [9] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
- [10] 刘铭, 刘爱华, 邹家强, 等. 软土地区基坑施工对堤防稳定性影响的控制措施[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3726-3731.

(本文编辑 赵娟)

- [8] MURPHY R R, PERLMAN E, BALL W P, et al. Water distance based Kriging in Chesapeake Bay[J]. Journal of hydrologic engineering, 2015, 20(9): 05014034.
- [9] 段光磊. 冲积河流冲淤量计算模式研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [10] 徐志扬. ArcGIS 平台的河床演变分析方法与系统研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

(本文编辑 王璁)