



二线船闸基坑施工对既有一线船闸 扰动实测影响分析

唐捷朗¹, 刘洪一^{2,3}, 高君杰¹, 陈娟¹

(1. 广东省北江航道开发投资有限公司, 广东 广州 510111; 2. 中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 广州 510275;
3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 依托北江航道扩能升级工程清远水利枢纽二线船闸深基坑工程, 通过开展既有船闸水平位移、沉降、振动与闸间土体深层水平位移实时监测, 分析了二线船闸深大基坑开挖对临近一线船闸的扰动特征。结果表明: 二线船闸基坑开挖过程, 既有一线船闸闸室水平位移与沉降呈现两侧大中间小的分布规律; 基坑开挖深度大于5 m后, 既有一线船闸沉降速率显著增大, 且一线船闸两侧易产生不均匀沉降; 闸间土体水平位移与临时支撑轴力的设置密切相关, 最大累积变形为11.6 mm; 一线船闸振动监测点最大振速为0.079 6 cm/s。由结果可知, 二线船闸深大基坑开挖过程中, 临近一线船闸的变形扰动控制在安全范围, 确保了船闸结构及通航运营安全, 研究成果可供船闸监测借鉴与参考。

关键词: 深基坑; 船闸; 实时监测; 扰动特征

中图分类号: TV6; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0203-08

Measured influence of disturbance of second-line ship lock foundation pit construction on existing first-line ship lock

TANG Jielang¹, LIU Hongyi^{2,3}, GAO Junjie¹, CHEN Juan¹

(1. Guangdong North River Channel Development and Investment Co., Ltd., Guangzhou 510111, China;

2. College of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Relying on a deep foundation pit project of the Qingyuan water control project second-line ship lock in the channel capacity expansion and upgrade project of North River, by carrying out real-time monitoring of the horizontal displacement, settlement, and vibration of existing ship lock and deep soil horizontal displacement between ship locks, this paper analyzes the disturbance characteristics of the second-line ship lock deep foundation pit excavation on adjacent first-line ship lock. The results show that in the process of second-line ship lock foundation pit excavation, the horizontal displacement and settlement of the lock chamber of the existing first-line ship lock follows the distribution law of large on both sides and small in the middle. When the excavation depth of the foundation pit is greater than 5 m, the settlement rate of the first-line ship lock increases significantly, and uneven settlement is likely to occur on both sides of the first-line ship lock. The soil horizontal displacement is closely related to the setting of the temporary axial force of the internal support, and the maximum cumulative deformation is 11.6 mm. The maximum vibration velocity of the first-line ship lock vibration monitoring point is 0.079 6 cm/s. During the second-line ship lock deep foundation pit excavation, the deformation disturbance on the adjacent first-line ship lock is controlled within a safe range, and the safety of the structure and operation of the ship lock is ensured. The research results can be used as a reference for the monitoring of ship locks.

Keywords: deep foundation pit; ship lock; real-time monitoring; disturbance characteristic

收稿日期: 2022-12-05

作者简介: 唐捷朗 (1964—), 男, 高级工程师, 从事水利、水运工程建造与研究工作。

“十三五”时期,我国新增及改善内河航道里程达5 000 km,其中新增高等级航道2 600 km^[1]。目前航道升级改造主要采用梯级渠化与航道整治相结合的方式,其中旧闸重建、新建高等级船闸为主要建设内容^[2]。考虑到通航水流条件及周边环境限制,新建二线船闸紧邻既有一线船闸。因此,新建船闸深大基坑工程开挖施工可能引起已建船闸产生过大附加位移,进而影响船闸的安全及正常工作^[3-5]。关于基坑开挖对临近船闸扰动特征方面,一些学者依托具体工程开展了相关研究。罗鹏飞等^[6]建立了邻近船闸首基坑开挖二维有限元模型,探究基坑船闸间距离、基坑的坡度等因素对邻近船闸的扰动情况,明确了邻近船闸基坑开挖最小安全间距及基坑放坡开挖坡度值。郄禄文等^[7]为研究新建基坑对邻近已建船闸的影响程度,通过数值建模分析了支撑道数、地连墙厚度、地连墙排距、开挖基坑与已建船闸间距对既有船闸位移影响规律。刘志军等^[8]通过数值建模探究新建船闸基坑开挖对既有船闸及临近建筑物的影响,论证了采用双排地连墙与内支撑支护方案对控制临近船闸扰动的有效性。罗翔^[9]建立了三维连续介质基坑开挖有限元模型,对比进行和未进行土体加固基坑开挖对双排地下连续墙结构变形、弯矩和坑底隆起及邻近船闸结构变形的影响,并与实际监测数据进行对比分析。羊科印^[10]以西安某深基坑工程为例,通过数值分析和施工监测,分析基坑开挖对临近建筑结构变形的扰动特征。余允吉等^[11]为探明既有船闸结构缝变化受临近基坑变形和环境温度的影响规律,通过数值建模与现场监测,分析了结构缝变化的成因及各因素的影响情况。

综上,现有研究多基于数值模拟手段,实际工程船闸变形监测分析方面研究较少,而采用合理的监控措施,既可确保既有船闸安全,又可揭示实际深大基坑施工过程对既有船闸结构变位影响。本文依托北江航道扩能升级工程清远水利枢纽二线船闸深基坑工程,对临近船闸变形、振动以及相邻一、二线船闸之间土体深层位移等进行监测分析,旨在为同类工程监控方案设计与变形控制提供参考。

1 工程概况

1.1 位置及规模

清远水利枢纽坝址位于北江干流清远城区下游石角镇大燕河口上游约1.0 km处,清远船闸是清远水利枢纽的组成部分,现有一线船闸紧邻泄水闸布置在航道右岸,一线船闸有效尺度为180 m×23 m×4.5 m(闸室长×宽×槛上水深)。北江航道扩能升级工程清远水利枢纽二线船闸布置在一线船闸的右侧滩地,两闸平行,中心间距90 m。二线船闸上闸首左侧与现有一线船闸门库段相接,右侧与清远水利枢纽土坝连接(图1)。清远枢纽二线船闸建设规模为220 m×34 m×4.5 m(闸室长×口门宽×槛上最小水深)。二线船闸右侧与清西围防洪堤间的滩地地面高程约15.0 m,基坑开挖平均深度约22 m^[12](图2)。



图1 平面布置

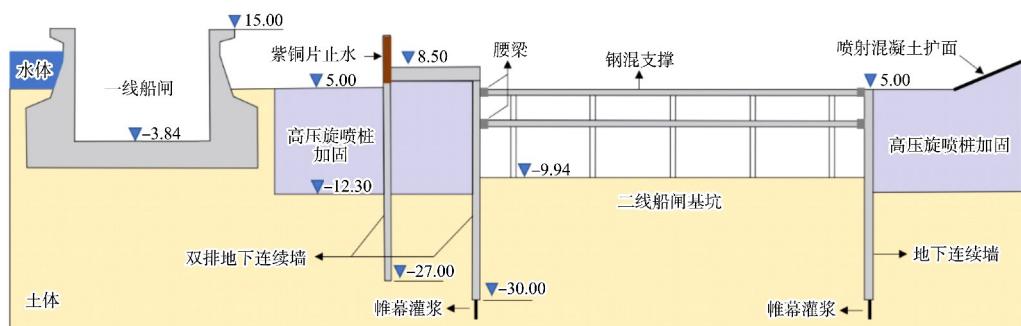


图2 基坑1-1断面 (单位: m)

1.2 水文地质条件

据水位地质勘察资料, 本工程勘探深度内土层依次为①_a 素填土、①_b 填砂、①₁ 粉质黏土、①₃ 中粗砂、②₂ 淤泥质粉质黏土、②₃ 粉细砂层、④₁ 圆砾及④₂ 卵石^[13], 地质断面见图3。基岩为泥盆系天子岭组灰岩、炭质页岩及⑦₂ 砂岩。地下

水类型主要为第四系孔隙水(潜水、承压水)和基岩岩溶含水层。勘察期间, 测量地下水位埋深2.40~9.10 m, 最大埋深16.90 m。上游(以既有清远水利枢纽作为上下游分界)地下水位稍高, 水位高程12.70~14.20 m; 下游地下水位稍低, 水位高程2.00~9.40 m。

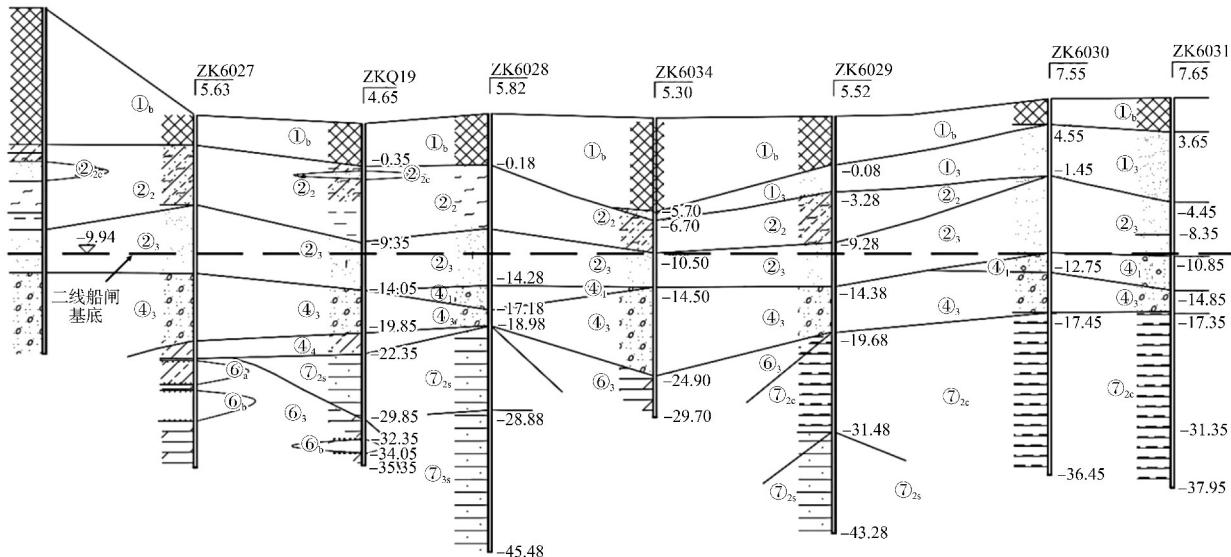


图3 二线船闸基坑地质横断面

2 监测方案

2.1 监测内容及测点布置

为确保二线船闸施工期间一线船闸的安全运行, 对一线船闸的变形以及一、二线船闸闸间土体深水平位移进行监测; 此外, 考虑到二线船闸基坑局部孤石破除和施工振动可能对一线船闸

的结构安全造成影响, 开展了一线船闸质点振动速度监测, 监测点布置见图4。闸体变形采用高等级自动照准全站仪施测, 微振监测采用进口Instantel Minimate Pro4型振动监测仪(W₁、W₂测点)和国产NUBOX-8016型振动记录仪(W₃、W₄测点), 深层水平位移采用加拿大RST测斜仪。

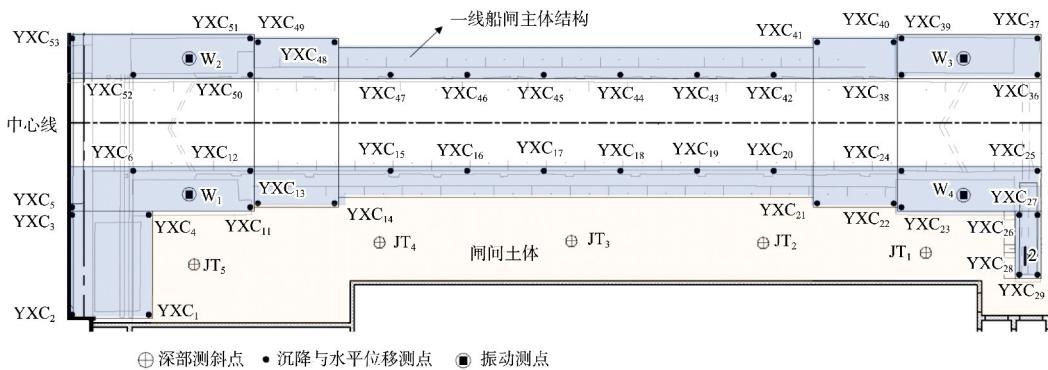


图4 一线船闸闸体结构范围的监测点平面布置

一线船闸的水平位移和沉降观测点布置在上闸首、上闸首门库、下闸首、下闸首门库、闸坝、闸室和上/下游导航墙, 见图 5a); 一线船闸上闸首位置布置 4 个振动监测点, 监测二线船闸连续

墙施工过程中冲击振动对一线船闸的影响, 见图 5b); 一、二线船闸之间土体布置 5 个深层水平位移测点, 监测施工过程中土体变形发展情况, 见图 5c)。

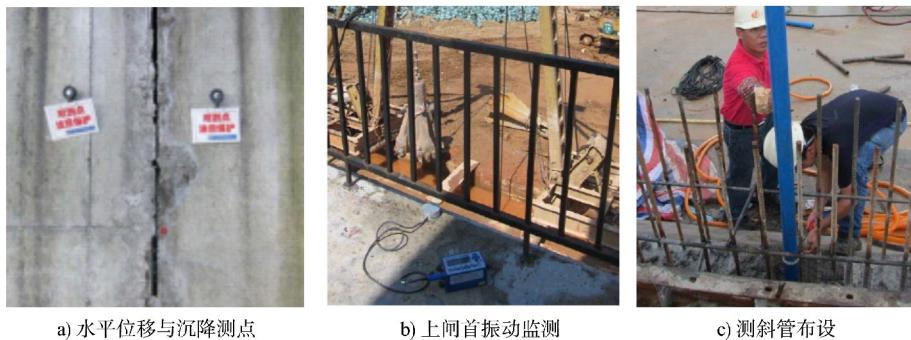


图 5 现场测点布设

2.2 监测频率与预警值

拟建闸址区紧邻一线船闸, 施工期间需观测一线船闸的变形, 分析二线船闸基坑开挖及降水等对一线船闸影响的程度。1) 初值测量: 在基坑开挖前观测沉降位移点两次以收集原始数据和初值。2) 基坑开挖期间监测频率: 基坑开挖深度 0~5 m 范围为 1 次/2 d; 基坑开挖深度 5~11 m 范围为 1 次/d; 基坑开挖深度 11 m 至基坑底部为 2 次/d; 基坑开挖至设计内撑、锚杆位置施工前后分别增加 1 次; 结构物底板浇筑 7 d 以内为 2 次/d,

底板浇筑 7~14 d 为 1 次/d, 底板浇筑 14~28 d 为 1 次/3 d, 28 d 后为 1 次/5 d; 施工过程中需拆除内撑、锚杆时, 分别在拆除前后增加 1 次; 如遇特殊工况(洪水、地震、连续降雨、基坑边出现超载等外部条件变化较大的情况), 根据实际情况增加观测频率。依据 JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》、GB 6722—2014《爆破安全规程》中对船闸主体结构变形及允许质点振动速度的要求, 结合工程计算分析报告与工程类比综合确定监测数据预警值, 见表 1。

表 1 一线船闸工程监测预警值

船闸沉降		船闸水平位移		闸间土体深层水平位移		允许质点振动速度/(cm·s ⁻¹)	
累计值/mm	变化速率/(mm·d ⁻¹)	累计值/mm	变化速率/(mm·d ⁻¹)	累计值/mm	变化速率/(mm·d ⁻¹)	0.5	
20	3	30	3	50	3		

3 监测数据分析

3.1 船闸水平位移及沉降变形分析

1) 累计变形分析: 二线船闸深基坑开挖完成后, 既有一线船闸各测点沉降与水平位移累计值平面分布, 见图 6。二线船闸深基坑开挖卸荷导致既有一线船闸产生明显的竖向沉降和向基坑内的水平位移, 一线船闸各测点最终累计沉降量为 -10.89~ -0.15 mm, 累计水平位移为 -3.0~22.9 mm,

均小于预警值。由于一线船闸上、下闸首距开挖基坑较近, 因此实测的沉降与水平位移均呈现两侧大中间小的分布规律, 最大沉降和水平位移位于上闸首的 YXC₂、YXC₃ 测点。此外, 由于施工期间出现集中降雨, 清远枢纽开闸放洪, 导致一线船闸闸室墙体临近北江一侧(YXC₄₂~YXC₄₇)位移明显大于内侧闸室墙体(YXC₁₅~YXC₂₀)。

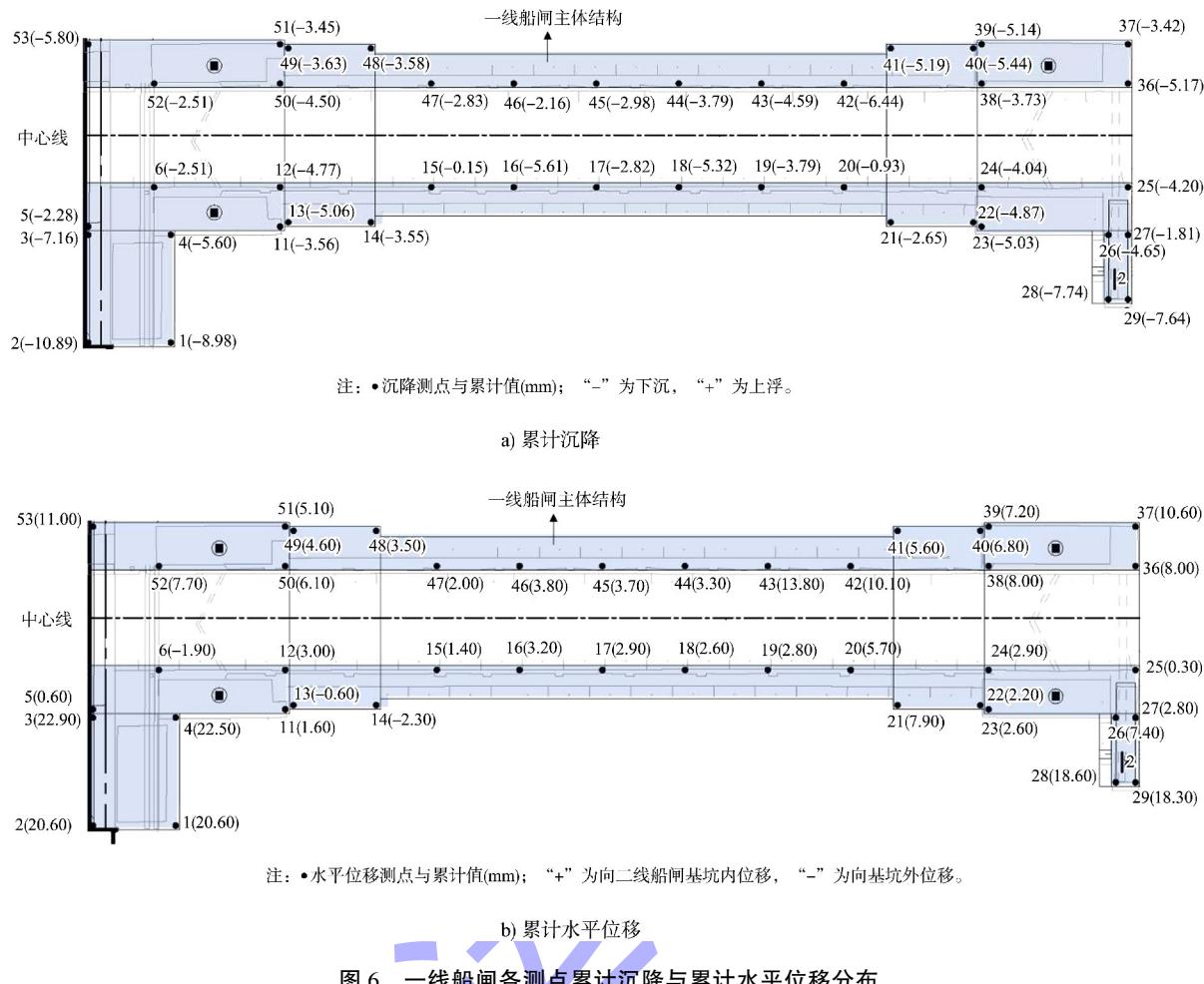


图6 一线船闸各测点累计沉降与累计水平位移分布

2) 变形时程曲线分析: 上闸首(YXC₁、YXC₃)、下闸首(YXC₂₆、YXC₂₈)、闸室墙(YXC₁₈、YXC₄₄)代表性测点沉降实测过程线, 见图7。二线船闸基坑开挖深度为5 m时, 各个测点的沉降均小于4 mm。由于二线船闸基坑第1道撑未及时安装, 导致一线船闸结构各测点沉降速率增大。当第1道撑安装完成后, 各测点的沉降曲线收敛至水平状, 但随着基坑继续开挖至11 m, 各测点的沉降速率进一步增大。其中, 上闸首(YXC₁)和下闸首(YXC₂₈)距离二线船闸基坑最近, 导致这两处结构累计沉降最大, 上闸首(YXC₃)、下闸首(YXC₂₆)与闸室墙(YXC₁₈、YXC₄₄)距离新建基坑较远, 且有闸间土体作为缓冲, 总体沉降较小。第2与第3道撑安装完成后, 支护结构刚度有效增大, 上闸首(YXC₃)、下闸首(YXC₂₆)与闸室墙(YXC₁₈、YXC₄₄)沉降时程曲线收敛至水平。从第3道撑完成到开挖至基底, 上闸首(YXC₁)和下闸首(YXC₂₈)呈现较小幅度的

沉降, 开挖至基底以后沉降曲线收敛至水平状。实测数据变化过程可知, 一线船闸主体结构靠近二线基坑部位累计沉降大于另一侧, 但不均匀沉降总体较小。

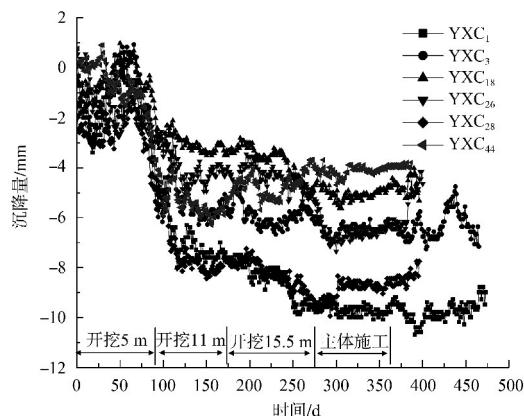


图7 一线船闸结构沉降实测过程线

上闸首(YXC₁、YXC₃)、下闸首(YXC₂₆、YXC₂₈)、闸室墙(YXC₁₈、YXC₄₄)代表性测点水平位移实测过

程线, 见图 8。二线船闸深基坑开挖初期(0~5 m), 各测点的水平位移较小(≤ 5 mm)。当基坑开挖深度达 11 m, 受基坑开挖卸荷效应和坑外水土压力的作用, 上闸首(YXC₁、YXC₃)和下闸首(YXC₂₈)的水平位移迅速增大; 由于 YXC₂₆ 测点距基坑较远, 水平位移影响较小, 显著小于测点 YXC₂₈; 此外, 阀间土体采用搅拌桩加固, 因此阀室墙(YXC₁₈、YXC₄₄)在该阶段水平位移较小。当基坑开挖至基底(15.5 m), 上闸首(YXC₁、YXC₃)和阀室墙(YXC₁₈、YXC₄₄)的水平位移曲线收敛至水平状, 而下闸首(YXC₂₆、YXC₂₈)的水平位移仍呈现增长趋势。从二线船闸基坑开挖至基底到主体结构完成, 各个测点的水平位移均收敛至水平状, 分析认为, 基坑底板浇筑完成后围护结构的整体刚度增大, 对两侧地连墙起到很强的约束作用, 有效遏制了新建基坑围护结构的变形, 使得一线船闸结构的水平位移变化较小。

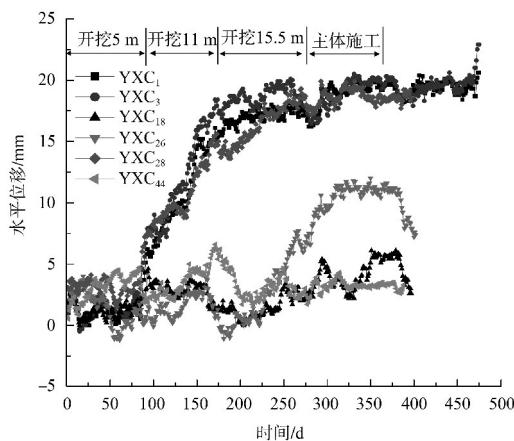


图 8 一线船闸结构水平位移实测过程线

3.2 阀间土水平位移分析

阀间土水平位移累计位移和最大位移, 见表 2, 可知各区域阀间土体发生了轻微程度的水平位移, 实测数值较小, 主要得益于施工期间采用了高压旋喷桩对阀间土体进行加固处理, 既稳定了阀间土体, 又降低了基坑施工对既有船闸阀室的变形影响。监测点 JT₅ 处土体累计水平位移最大为 11.6 mm, 此时二线船闸基坑正开挖至基坑底部, 由于基坑内土体的卸载, 导致阀间土体发生向二线船闸侧较明显的水平位移。

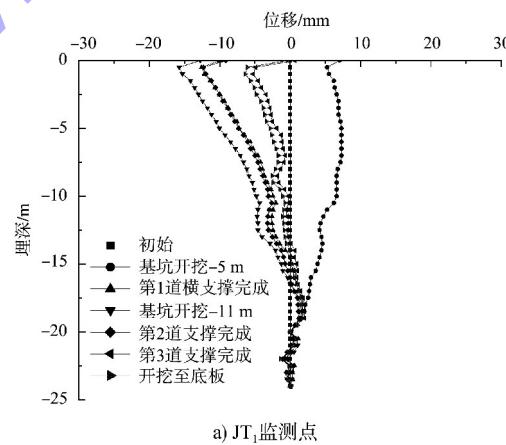
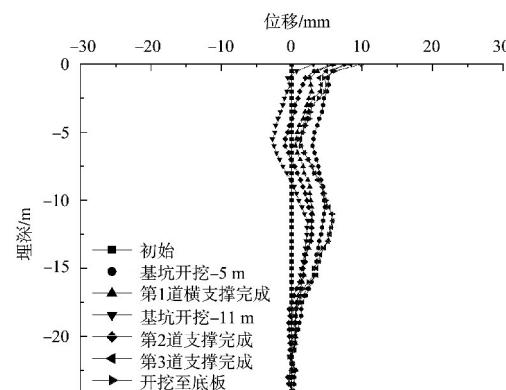
表 2 阀间土水平位移累计值

测孔	累计位移/mm	埋深/mm
JT ₁	-6.4	-1.0
JT ₂	-3.9	0.0
JT ₃	9.8	0.0
JT ₄	7.7	0.0
JT ₅	11.6	-5.5

在二线船闸不同施工阶段下监测点 JT₁、JT₃ 和 JT₅ 随埋深变化的水平位移, 见图 9。监测点 JT₁、JT₃ 和 JT₅ 分别位于靠近下闸首、阀室墙中部和上闸首处。可以看出, 基坑开挖面以上水平位移较大, 基坑底部以下水平位移较小。

1) 基坑开挖深度为 5 m 时, 由于土体初始卸荷作用导致各监测点处土体朝基坑内变形, JT₁、JT₃ 测点位移最大值出现在地表, 最大均为 7.5 mm, 监测点 JT₅ 处土体最大水平位移位于埋深 5.5 m 处。

2) 第 1 道支撑完成后, 由于临时支撑轴力设置较大, 靠近地连墙的监测点 JT₁ 处土体产生基坑外侧位移, 且随着埋深增大土体位移逐渐减小; 监测点 JT₃ 土体基本稳定; 监测点 JT₅ 土体仍向基坑内变形。

a) JT₁ 监测点b) JT₃ 监测点

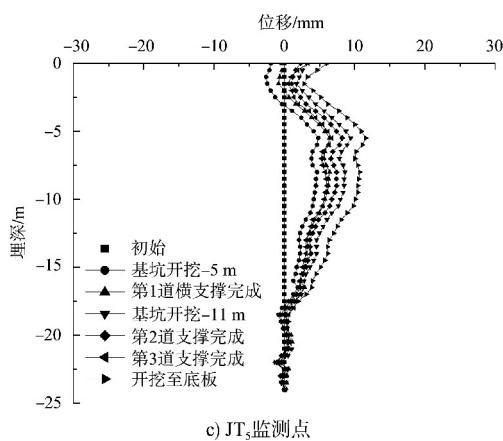


图9 闸间土体水平位移曲线

3) 当基坑开挖深度为 11 m 时, 监测点 JT_1 处土体进一步朝基坑外变形, 埋深 1 m 处最大水平位移为 -16 mm , 为各施工阶段中最大水平位移; JT_3 监测点 9.5 m 埋深以下土体开始朝基坑内变形; 监测点 JT_5 处土体水平位移继续增大, 最大水平位移仍发生在埋深 5.5 m 处。

4) 第 2 道撑和第 3 道撑完成后, 监测点 JT_1 处土体水平位移曲线向初始位移曲线靠拢, 尤其是第 3 道撑完成后; 监测点 JT_3 处土体朝基坑内发生变形, 最大变形发生在埋深 11 m 处, 最大水平位移为 6 mm ; 监测点 JT_5 处土体在第 2 道撑完成后水平位移有所减小, 第 3 道撑完成后水平位移进一步减小, 说明内支撑的及时施作可有效减少开挖对闸间土体的扰动。

5) 当基坑开挖至基底时, 监测点 JT_1 和 JT_3 处土体位移基本稳定; 监测点 JT_5 处土体进一步向基坑内变形, 并达到该处的最大累计位移值。

3.3 船闸振动分析

基坑开挖初期在一线船闸上闸首布置 4 个振动监测点, 监测二线船闸连续墙施工过程中冲击振动对一线船闸的影响, 共完成 11 次振动测试。结果显示: 基坑表层土体开挖过程, 振动监测点最大振速为 0.0796 cm/s (测点 W_1), 测点位于一线船闸上闸首距离二线船闸连续墙施工区域最近位置, 监测最大振动速度远小于规程要求的允许值。

4 结论

1) 既有一线船闸结构随着二线船闸基坑施工, 距新建基坑较近的船闸结构 (YXC_1 、 YXC_3 、 YXC_{26} 、 YXC_{28}) 水平位移逐渐增大, 距新建基坑较远的区域 (YXC_{18} 、 YXC_{44}) 无明显影响, 且水平位移沿闸室长度方向呈现两侧大中间小的分布规律。

2) 新建基坑开挖深度大于 5 m 时一线船闸结构沉降变形速率增大, 通过采取双排地下连续墙支护与闸间土高压旋喷桩加固措施, 一线船闸主体结构的不均匀沉降变化总体较小, 结构整体稳定, 无明显新增混凝土裂纹。

3) 基坑开挖至底板后, 闸间土体最大累计水平位移在监测点 JT_5 埋深 5.5 m 处, 为 11.6 mm ; 基坑土体开挖至设计埋深及时架设内支撑, 可有效限制闸间土体的水平位移。

4) 既有一线船闸振动监测点最大振速为 0.0796 cm/s (W_1 测点), 监测最大振动速度远小于规程要求的允许值, 说明新建基坑施工振动对既有一线船闸影响较小。

5) 既有一线船闸的变形不仅与新建基坑施工有关, 更与上下游水位的升降、温度应力、船舶撞击和日常运营强度及安全管理等有密切的关系, 综合多方面因素考虑既有一线船闸闸室的变形, 更有利于精准判断船闸状况, 保障一线船闸的安全运营。

参考文献:

- [1] 韦之杰. 内河之间(一): 内河水运是综合运输体系的短板[J]. 珠江水运, 2022(6): 22-26.
- [2] 许修亮, 唐凯, 吕世明, 等. 考虑桩侧摩阻力的桥桩单侧开挖稳定性精细化数值模拟分析[J]. 水道港口, 2021, 42(6): 790-797.
- [3] 储诚富, 董满生, 胡晴, 等. 船闸基坑边坡中桥梁基桩力学特性研究[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 57-63.
- [4] 王志鹏, 曹周红, 祝伟程, 等. 船闸深基坑开挖对桥桩边坡应力的影响[J]. 水运工程, 2019(3): 146-153.
- [5] 姜燕, 杨光华, 谢志杰, 等. 清远二线船闸典型基坑支护结构计算分析[J]. 广东水利水电, 2020(2): 20-28.
- [6] 罗鹏飞, 刘晓平, 曹周红, 等. 邻近船闸基坑开挖安全影响因素[J]. 水运工程, 2016(4): 113-117.

- [7] 郜禄文, 张佳强, 任泉, 等. 双排地连墙深基坑对邻近船闸的多因素影响分析[J]. 水运工程, 2021(7): 192-198.
 - [8] 刘志军, 姜燕, 黄茂兴, 等. 某二线船闸基坑施工对既有二线船闸的影响分析[J]. 广东水利水电, 2021(8): 78-83.
 - [9] 罗翔. 土体加固对基坑支护结构性状和邻近船闸的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
 - [10] 羊科印. 基坑开挖对基坑及临近建筑物的变形影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

(上接第 176 頁)

- [2] 张星星, 陈明栋, 巴添. 新型浮式系缆装置关键技术及可靠性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 489-493.
 - [3] 吴俊, 舒岳阶, 周世良, 等. 大型港工系船柱结构安全监测方法与实验[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1631-1639.
 - [4] 刘明维, 曾丽琴, 齐俊麟, 等. 船闸浮式系船柱受力状态数值模拟[J]. 水运工程, 2020(12): 112-117.
 - [5] 刘明维, 李明龙, 吴林健, 等. 船闸浮式系船柱受荷响应力学模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022,

(上接第 187 页)

5 结论

- 1) 利用基槽与航道设计施工图、水深测量数据、地形塌陷工具,实现了快速建立复杂基槽航道搭接段的三维模型。
 - 2) 利用基槽航道搭接段模型与三维色差图工具、断面分析工具、超欠挖量计算工具,实现了三维可视化分析搭接段的开挖质量,包括利用三维色块与超欠挖数值分析搭接段的超挖深度与欠挖厚度、任一断面分析搭接段开挖质量、输出搭接段任一局部区域超挖与欠挖工程量。
 - 3) 模型与断面法的计算结果相差在 $\pm 1\%$ 以内,满足工程使用要求。
 - 4) 成果具有计算精度高与速度快、断面分析整体性与连续性好、三维可视化效果好等优点,较好地解决了断面法分析复杂基槽航道搭接段开挖质量存在的不足,特别适用于存在多重搭接的复杂线性工程搭接段的施工质量的三维可视化分析。

参考文献·

- [1] 王辉辉.广元至陕川界高速公路新旧路堤搭接段变形

- [11] 余允吉, 方大勇, 廖珊珊, 等. 某船闸结构缝变形控制值评估方法研究[J]. 广东水利水电, 2020(2): 103-106.
 - [12] 高君杰, 郑跃. 北江清远枢纽二线船闸基坑关键技术研究[J]. 中国水运, 2022(3): 134-136.
 - [13] 邓凤学. 广东北江清远枢纽二线船闸工程重、难点分析及施工对策研究[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(6): 130-132.

(本文编辑 赵娟)

- 41(5): 127-132.

[6] 尹斌勇, 张虎, 刘虎英. 湘江长沙综合枢纽船闸新型浮式系船柱应用及特点[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(3): 150-153.

[7] 张虎, 尹斌勇. 船闸新型浮式系船柱的设计与应用[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 137-140.

[8] 李超军, 叶雅思, 唐洁. BIM 技术在船闸金属结构全生命周期中的应用[J]. 水运工程, 2019(3): 159-164.

(本文编辑 王璁)

- 性状研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.

[2] 孙广臣, 傅鹤林, 巢万里. 桥隧搭接工程多源损伤及车辆冲击模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(2): 115-123.

[3] 王伟, 杨志. BIM 技术在内河航道设计中的应用[J]. 水运工程, 2019(7): 193-197, 236.

[4] 董思远, 范海文, 张金刚. BIM 技术在内河航道工程中的应用[J]. 水运工程, 2019(11): 127-132.

[5] 邓小东, 张春亢, 曹婷婷, 等. 土方量计算的几种方法及精度分析[J]. 矿山测量, 2019, 47(6): 67-70.

[6] 赵勇, 黎慕韩, 余雅滢. 基于改进断面法的港口工业区垫道土方量计算[J]. 城市勘测, 2020(6): 139-141.

[7] 赵丽, 陈懿强. 基于 CIVIL 3D 航道疏浚量断面法计算的研究[J]. 港工技术, 2018, 55(3): 17-20.

[8] 罗德仁, 邹自力, 汤江龙. 工程土方量计算比较分析[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(1): 59-64.

[9] 王伟, 叶敏, 刘静波. 河道槽蓄量计算模块功能设计与实现[J]. 人民长江, 2014, 45(2): 66-70.

[10] 陈懿强, 黄晔卉. 基于 CIVIL 3D 的疏浚工程量计算分析[J]. 港工技术, 2018, 55(6): 20-22.

(本文编辑 王传瑜)