

水下机器人在入海水道通榆河 立交工程涵洞的探查应用

徐晨轩^{1,2}, 朱承志³, 万 青^{1,2}, 季婷婷^{1,2}, 徐 鑫^{1,2}, 张颖良^{1,2}

(1. 江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223001; 2. 江苏省淮河入海水道工程管理处, 江苏 淮安 223001;
3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要:入海水道通榆河立交工程经多年运行,需对难以精确检查的水下部分进行详实探查。结合历年水下检查成果报告、工程现状调查分析报告等资料,以20#涵洞为典型场景,选择搭载水下光学摄像设备、二维图像声呐传感器、全向成像声呐等设备的水下机器人进行水下探查,为工程运行管理和安全评估提供参考。

关键词:涵洞; 水下机器人; 混凝土; 涵洞探查; 通榆河

中图分类号:TV698.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2024)06-0061-0005

Application of underwater robot in culvert exploration of Tongyu River interchange project of the estuary waterway

XU Chenxuan^{1,2}, ZHU Chengzhi³, WAN Qing^{1,2}, JI Tingting^{1,2}, XU Xin^{1,2},
ZHANG Yingliang^{1,2}

(1. General Irrigation Canal Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China;
2. Huaihe River Into the Sea Waterway Project Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China;
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: The Tongyu River interchange project of the estuary waterway has been in operation for many years and requires detailed exploration of the underwater parts that are difficult to accurately inspect. Combined with previous reports on underwater inspection results and engineering status investigation and analysis reports, taking the 20# culvert as a typical scene, underwater robots equipped with underwater optical camera equipment, two-dimensional image sonar sensors, omnidirectional imaging sonar and other equipment were selected for underwater exploration, providing reference for engineering operation management and safety assessment.

Key words: culverts; underwater robots; concrete; exploration of culvert; Tongyu River

1 概 述

长期运行会给水利工程建筑物带来不同程度的损伤和缺陷,如泥沙淤积及混凝土裂缝、冲蚀、剥落、露筋等。这就需要通过工程检查及时发现,尽

早处理,其中水下部分尤为重要,检查方法包括潜水员探摸、水下机器人探查^[1-3]等。潜水员探摸方法受自然环境、水质条件、潜水员身体素质等多种因素制约,而水下机器人是能够在水下长时间作业的设备,在承担高强度和存在危险条件的水下作业更

收稿日期: 2024-02-29

作者简介: 徐晨轩(1993—),男,工程师,本科,主要从事水利工程管理工作。E-mail:2424128288@qq.com

显现出其明显的优势。入海水道通榆河立交工程已运行多年,亟需对难以精确检查的水下部分进行详实探查。结合历年潜水员水下检查成果报告和工程现状调查分析报告等资料,以20#涵洞为典型场景,选择搭载水下光学摄像设备、二维图像声呐传感器、全向成像声呐等设备的水下机器人进行水下探查,旨在查明涵洞内部淤积情况及混凝土表观是否存在缺陷,为后期运行维护和评估管理提供数据支撑。

2 工程概况

入海水道通榆河立交位于盐城市滨海县通榆镇,建成于2003年11月,为大(2)型,设计防洪标准按100年一遇洪水设计。入海水道通榆河立交工程采用上槽下洞结构型式,其下部为东西向箱涵,作淮河入海水道行水之用,设计泄洪流量 $2\,270\text{ m}^3/\text{s}$,共23孔箱涵,上下游翼墙采用空箱扶壁式挡土墙结构。渡槽为矩形断面,三级航道标准,槽宽58 m,渡槽总长165.12 m,涵洞上、下游洞首各配平板钢闸门及卷扬式启闭机,翼墙为钢筋混凝土空箱扶壁式结构。

3 水下机器人检查实施

在水流流速超过 0.5 m/s 的情况下,为保证水下机器人在涵洞内部运行平稳、检查顺畅,关闭所检涵洞上游闸门,使涵洞内水体基本处于静止状态。

3.1 场景选择

以入海水道通榆河立交20#涵洞探查为本次水下机器人探查的典型应用。涵洞尺寸为 $78.6\text{ m}\times 6.0\text{ m}\times 6.5\text{ m}$,涵洞底板位于水面以下约12.5 m。水体能见度在10 cm左右,闸门开启状态下基本没有水流,洞口附近水域基本没有漂浮杂物。涵洞内水体基本处于静止状态,无需关闭所检涵洞上游闸门。

3.2 水下机器人选择

选择河豚IV-A、河豚IV-B水下机器人探查,该水下机器人采用了可重组的开放式框架结构、数字传输的计算机控制方式、电力驱动形式,在其驱动功率和有效载荷允许的情况,可以覆盖全部水下作业任务。针对本次水下探查任务,配置不同的仪器设备、作业工具,即可准确高效地完成各种调查、水下干预作业、勘探、观测与取样等作业任务。技术参数和技术指标满足本次探查作业需要。

3.2.1 河豚IV-A

尺寸为 $72\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 48\text{ cm}$,质量30 kg,额定功

率3 kW,最大潜水深度300 m。航向分辨率 0.1° 、精度 $\pm 2^\circ$,深度分辨率0.01 m,温度分辨率 0.01°C ,姿态、横摇、俯仰的分辨率 0.1° 。可检测温度、压力、湿度、漏水监控等状态,搭载外置观测系统为水下光学摄像设备。

3.2.2 河豚IV-B

耐压深度500 m,脐带缆长度300 m。推进器数据及安装方式为3个水平矢量推进器,1个垂直推进器,推进力包括前进推力、垂直推力、侧向推力。水下负载能力5.0 kg,内置航向、姿态、深度等传感器。搭载高清彩色摄像的前视摄像头,外置二维图像声呐传感器,测量范围100 m,量程分辨率2.5 cm。搭载外置全向成像声呐等传感器,作业时有2种频率可供选择。

3.3 工作平台设置

根据现场检测环境条件,水下机器人要从地涵下游洞口进入,往上游方向行进,依次完成各项检查工作,故工作平台选择布设于涵洞下游出口旁路面,现场采用发电机为水下机器人工作系统提供220 V电压。现场检测技术人员共4名,1名水下机器人操作员,1名领航员,2名脐带缆管理员,临水边作业人员须做好个人防护措施。现场采用对讲机实时通讯,各工作部位人员之间确保指令传达准确,检测工作配合紧密协调。完成水下机器人工作前的密封、通电、操作测试,随后选择开阔水域进行下水试验,进一步确认水下能见度,测试与调整水下机器人系统的各项参数,使水下光学摄像设备以及水下图像声呐等设备处于最佳工作状态,为涵洞水下检查的开展提供保障。

3.4 探查工作实施

检查涵洞内淤积情况及表观混凝土是否存在缺陷,明确缺陷类型、分布位置、形态大小、数量规模等信息。视水体能见度情况、重点关注部位(如门槽、结构缝)及声学检查异常部位采用网格化加密测线抵近观察,对洞壁混凝土表观进行局部抽查,以验证、复核图像声呐检查结果的准确性。水下机器人检查主要布置4条检查测线^[4]。

3.4.1 测线1

水下机器人沿涵洞中轴线从下游往上游方向行进,采用二维图像声呐扫描普查洞内淤积及过流面阻塞情况,了解掌握洞内基本环境情况,提前规避危险部位,确保检查设备的安全运行。

3.4.2 测线2

水下机器人沿洞轴线返回期间,采用全向成像

声呐采集涵洞淤积断面数据,直至整条涵洞淤积情况检查完成。

3.4.3 测线3和测线4

淤积检测完成后,调整二维图像声呐安装角度,水下机器人靠近洞壁,沿上下游方向往返行进,分别对左、右洞壁表观混凝土进行扫描,检查表观混凝土是否存在明显破损、剥落等缺陷。

4 检测数据处理

4.1 水下摄像数据处理

水下检查摄像记录通过地面控制单元完成数据存储,影像记录信息包含影像资料、潜器单元的前进方位角、侧倾角度、摄像头姿态、下潜深度、拍摄时间、潜器单元工作时长等。通过整理、剪辑,结合现场水下检查记录日志,截取缺陷的部位影像资料,采用后处理软件进行相关信息的标注处理,生成典型缺陷摄像成果图。以探查右壁闸门门槽为例,闸门门槽表观混凝土结构完好,未见明显缺陷。

4.2 二维图像声呐数据处理

将采集的二维图像声呐影像数据整理,剪辑提取出清晰的影像资料,对其进行解译分析,并进行结构等特征部位及其他相关信息的标注。二维图像声呐数据处理成果见图1。

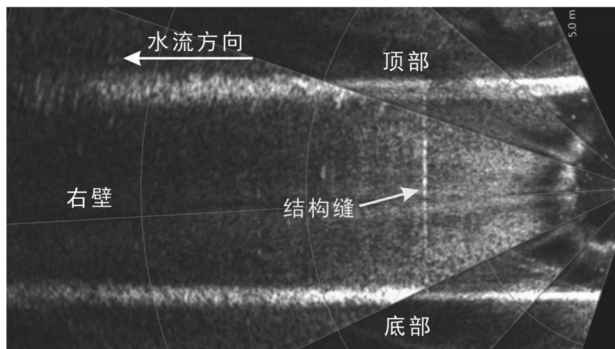


图1 二维图像声呐数据处理成果

4.3 全向成像声呐数据处理

将全向成像声呐采集的涵洞淤积断面数据进行整理,按间距5 m提取涵洞淤积断面。对实测断面与设计断面进行对比分析,获取淤积厚度数据,并标注结构部位、尺寸大小等信息,制作生成涵洞淤积断面成果图。以探查桩号0+039为例,淤积厚度0.38 m,涵洞淤积断面成果见图2。

4.4 数据融合及可视化

根据相关资料图纸,绘制地涵BIM三维模型,

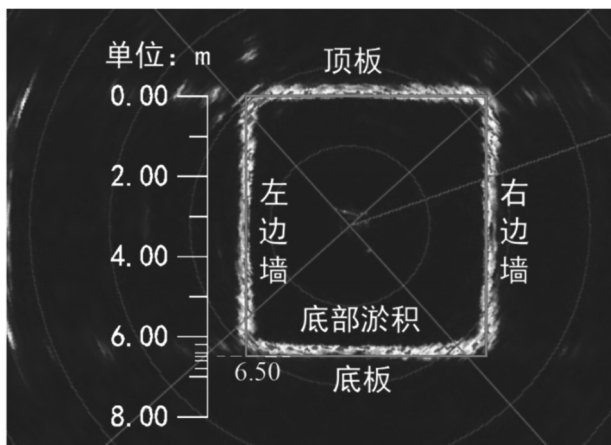


图2 涵洞淤积断面成果

并在三维模型上进行检查成果及特征部位位置的标注及融合等。成果数据与三维模型融合展示见图3。

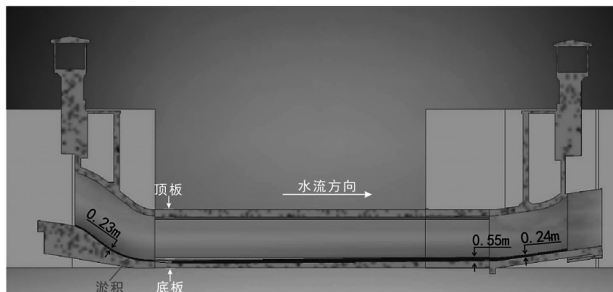


图3 涵洞淤积检查成果与三维模型融合展示

5 成果分析

5.1 涵洞淤积检查成果分析

将实测涵洞断面数据进行整理,按间距5 m提取涵洞典型横断面数据,将实测断面数据与设计资料进行对比分析,淤积成果表见表1,纵向淤积曲线见图4。根据检查结果分析,20#涵洞淤积情况如下:

(1)入海水道通榆河立交20#涵洞内部整体存在一定厚度的淤积,主要为泥质淤积物,总淤积量约 165.42 m^3 ,占比涵洞体积约5.30%,整体厚度为0.20~0.58 m,平均厚度约0.35 m。

(2)进口斜段平均淤积厚度约0.26 m,中部平段平均淤积厚度约0.39 m,出口斜段平均淤积厚度约0.31 m。中部平段相对于其他洞段淤积较厚,且从上游至下游递增,在中部平段与出口斜段过渡部位淤积最厚。

5.2 检查精度评价

本项目检查过程精度控制主要包括水下机器

表1 入海水道通榆河立交20#涵洞底部淤积厚度统计

断面桩号	距左1 m	距左2 m	距左3 m	距左4 m	距左5 m	平均厚度/m	淤积量占设计断面比例/%
0+000	0.20	0.22	0.21	0.25	0.23	0.22	3.42
0+005	0.24	0.23	0.25	0.22	0.24	0.24	3.63
0+010	0.25	0.23	0.28	0.24	0.25	0.25	3.85
0+014	0.38	0.29	0.26	0.35	0.43	0.34	5.26
0+019	0.47	0.30	0.21	0.21	0.30	0.30	4.58
0+024	0.32	0.30	0.30	0.31	0.38	0.32	4.95
0+029	0.49	0.38	0.32	0.41	0.50	0.42	6.46
0+034	0.35	0.28	0.28	0.30	0.49	0.34	5.23
0+039	0.47	0.33	0.30	0.30	0.49	0.38	5.82
0+044	0.48	0.30	0.28	0.33	0.48	0.37	5.75
0+049	0.39	0.38	0.30	0.36	0.50	0.39	5.94
0+054	0.42	0.40	0.29	0.35	0.50	0.39	6.03
0+059	0.50	0.45	0.43	0.45	0.50	0.47	7.17
0+063	0.52	0.52	0.46	0.55	0.58	0.53	8.09
0+069	0.31	0.34	0.22	0.29	0.33	0.30	4.58
0+074	0.33	0.37	0.26	0.32	0.29	0.31	4.83

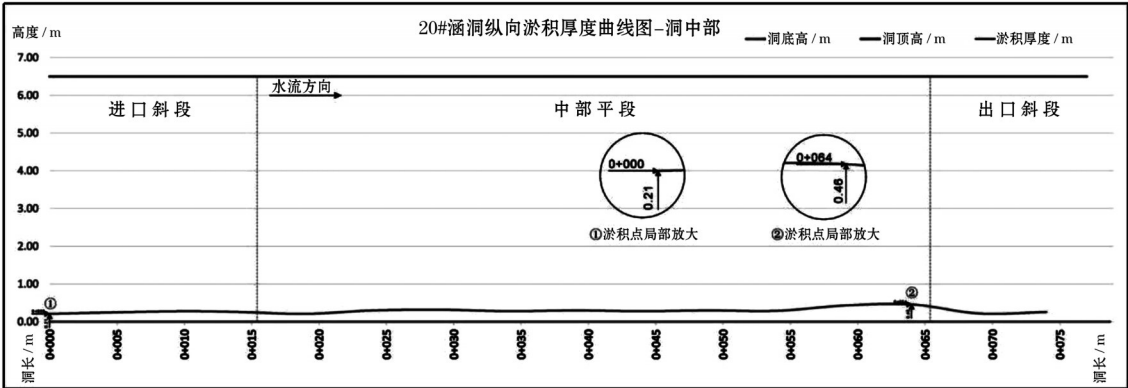


图4 入海水道通榆河立交20#涵洞底部纵向淤积厚度曲线(中部)

人定位精度及数据采集精度两方面。水平方向定位主要依靠设备通讯线缆长计数,同时结合二维图像声呐扫描结构物特征部位相对位置进行实时验证,以确保定位数据的准确性,高程方向主要依靠深度计传感器进行定位。数据采集主要依靠水下光学摄像、二维图像声呐、全向成像声呐综合进行数据采集,相互对比验证,提高数据精度,检查成果数据是否可靠。

6 结 论

入海水道通榆河立交地涵水下检查项目,根据

现场水体能见度现状,通过水下机器人搭载水下光学摄像设备、二维图像声呐、全向成像声呐等多参数传感器,开展涵洞内淤积情况及表观混凝土缺陷检查,并将水下实测成果与三维模型融合展示。通过对实测数据的整理与分析,可得以下结论:

6.1 淤积情况

入海水道通榆河立交20#涵洞内部整体存在一定厚度的淤积,主要为泥质淤积物,总淤积量约165.42 m³,占涵洞体积约5.30%,整体厚度为0.20~0.58 m,平均厚度约0.35 m。

进口斜段平均淤积厚度约0.26 m,中部平段平

均淤积厚度约 0.39 m,出口斜段平均淤积厚度约 0.31 m。相对于其他洞段中部平段淤积较厚,且从上游至下游递增,在中部平段与出口斜段过渡部位淤积最厚。

6.2 涵洞表观混凝土检查情况

20#涵洞洞壁表观混凝土未见明显破损、剥落等缺陷,结构缝及两侧表观混凝土未见明显缺陷。闸门门槽表观混凝土完好,其他洞壁表观混凝土未见明显缺陷。

适时采取措施进行淤积清理,涵洞表观混凝土完好,未见明显缺陷。建议定期进行水下检查,结合水下取芯进行抗压强度值测定,提高数据准确

性。同时,通过多种方法对比验证,辅助研判,进一步提高数据精度。

参考文献:

- [1] 李永龙. 水下机器人在水利水电工程检测中的应用现状及发展趋势[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018(16): 586-590.
- [2] 许可. 水下机器人及三维声呐技术在水闸安全鉴定中的应用研究[J]. 珠江水运, 2020(15): 89-90.
- [3] 夏清华. 水下机器人在水利工程汛前检查中的应用研究[J]. 中国防汛抗旱, 2022(32): 83-86.
- [4] 沈清华. 测量型水下机器人在水下构筑物缺陷检测中的应用[J]. 水利技术监督, 2021(9): 9-11.

(上接第 60 页)

可以看出沿海挡潮闸和内河水闸造价指标中,地基处理影响约为 9%和 3%,因此一般水闸造价指标不会因为地基处理的不同出现较大的波动。深淤土上水闸地基处理一般占总造价 20%以上,例如位于深淤土上的阜宁腰闸拆建工程地基处理费约占总造价的 27%,造价指标需要另行特别关注。

5 结 语

合理的水闸造价指标是判断工程方案经济性和工程概算准确性的标准。工程方案和概算对控制水闸工程造价的意义重大。另外,初步设计批复的工程概算一般作为招标控制价,对工程概算的准确性要求较高。

(1)原材料价格对单位闸孔净宽投资影响约为 13%,根据 2004—2023 年水闸投资价格差分析,2018 年至今价差基本一致,以 2022 年作为价格水平年后的造价指标可以作为近期水闸投资的控制参数。

(2)沿海挡潮闸由于挡洪时潮位高,排涝时潮

位低,两侧翼墙及上下游消能防冲设施投资占比较内河水闸高,水闸造价指标一般高 50%以上,单位闸孔净宽投资应按沿海挡潮闸和内河水闸分类归纳控制。

(3)除深淤土上水闸造价指标需要特别关注外,一般水闸单位闸孔净宽投资不会因为地基处理的不同出现较大的波动。

参考文献:

- [1] 闫凤新. 水闸除险加固设计阶段造价控制[J]. 水利建设与管理, 2012(1): 14-15.
- [2] 朱小鸥. 水闸除险加固工程设计阶段造价控制研究[J]. 珠江水运, 2018(2): 90-91.
- [3] 林亚岚,张新标. 基于模糊综合评价的灌区水闸工程造价控制研究[J]. 中国水能及电气化, 2021(6): 5-9.
- [4] 林继镛,王光纶. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [5] 柯洪,郭婧娟. 建设工程计价[M]. 北京:中国计划出版社, 2019.