

桥墩基础病害水下检测方法的对比与应用

杨晓明¹, 韦国志², 查庆¹, 熊文³, 殷新锋⁴

(1.安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥 230061; 2.安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230027;
3.东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 4.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:以多座桥梁基础病害的水下检测为背景,分别采用潜水检测、组合式水下摄像机检测及水下机器人检测进行水下基础表观病害识别,三维激光扫描、水下声呐三维扫描、GPS 结合水深仪进行桥墩基础冲刷状态与形态识别,考虑地理环境、水流速度、浑浊度、透明度等多种环境和水文参数对识别效果与效率的影响,对比不同水下识别方法的适用性与有效性。结果表明,组合式水下摄像检测仪、水下机器人及水下声呐三维扫描分别具有速度快、效率高与深水检测的优势,但对检测环境有一定要求,且操作较复杂;潜水检测对水质要求较低,但速度慢、检测费用高、潜水员人身安全威胁较大;三维激光扫描特别适用于枯水期基础暴露状态的冲刷识别;GPS 结合水深仪技术具有实时性、全天候、精度高等优点,但冲刷识别效率不高,无法快速识别;实际应用中需根据不同桥梁基础病害形式及测试环境进行水下识别方法选择。

关键词:桥梁;桥墩基础;表观损伤;基础冲刷;水下检测

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)05-0128-05

桥墩基础是桥梁结构的主要承重构件,荷载通过桥梁上部结构传递至基础,由基础直接承担荷载,因而基础质量与桥梁结构耐久性直接相关。基础属于隐蔽性工程,一般为砼结构。水下基础在役期间将长期承受水流的冲刷作用,基础砼中的外露钢筋极易遭受锈蚀;受限于目前的基础施工水平,基础表观也可能产生砼露筋、蜂窝、离析、不密实等现象,结构劣化程度严重,最终影响结构的耐久性和安全。

在国内,由于河流的冲刷,桥梁水下基础普遍存在周围被淘空和桩基裸露的现象。如福州乌龙江橘园洲大桥于 2002 年底建成通车至今,10 余年时间里河床下切 10 m,导致多个桥墩桩基外露,加之河水的冲刷,桩基承载力已接近临界状态。该桥是在河床下切、水位降低以后,桥墩基础状况不良的现象才被发现。而大多数桥梁建在江河湖海之中,其水下基础的技术状况并不能直接被人所知。国内很多桥梁检测并未将水下基础作为必检项目,大多数情况下只关注桥墩水上部分病害检测,即使进行水下基础检测,检测方法和内容也不具针对性。因此,开发桥梁基础水下检测及病害诊断技术刻不容缓。该文以多座桥梁基础病害水下检测为背景,对潜水检测、组合式水下摄像机检测及水下机器人检测识别水下基础表观病害,三维激光扫描、水下声呐三维扫描、GPS 结合水深仪识别桥墩基础冲刷状态与形态

的适用性和有效性进行对比分析,为桥墩基础病害水下检测方法选择提供参考。

1 桥梁基础损伤的特点

水下基础的病害主要分为冲刷与表观病害两类。其中:冲刷主要指基础周边河床下切和掏空,直接影响基础的承载力,且长期冲刷对基础的侵蚀作用会直接引起基础表观病害。表观病害指基础表面产生的蜂窝麻面、砼剥落、空洞、露筋锈蚀、微生物附着等缺陷,这些病害会不同程度影响水下基础的承载力,并持续向基础内部发展,威胁桥梁安全运营。其产生原因,一方面是基础长期运营中承受桥面交通及自身荷载作用,另一方面是水流冲刷等水环境作用及可能的施工质量问题。

不同水域桥梁基础损伤有其不同特点:1) 山区桥梁所处水系的水质较清澈、污染小,但水流速度较大。由于日常水流幅度较大,加上其特殊的地理环境,山洪爆发往往使河水携带大量泥沙,加剧桥梁冲刷。因此,山区桥梁的总体冲刷程度比其他水域严重。2) 水库桥梁桩基础以干湿交替最明显,桥梁桩基础常受到水和风的共同影响,表现为大面积轻微剥落和冲蚀。3) 平原跨河桥梁所处水系的水势较缓,水流速度小,桥梁总体冲刷程度比其他水域轻。但其水质优劣不均,管养时需考虑水中有害物质对

水下基础的影响。

检测时发现,不同的墩形和承台底面与河床的距离会影响水流对基础的冲刷程度。总体来说,尖头墩的冲刷程度<圆头墩的冲刷程度<方形墩的冲刷程度,承台底面低于河床时的冲刷程度<承台底面高于河床时的冲刷程度。

2 检测桥梁概况

安徽省境内桥梁所处地理环境以山区、水库和平原为主。将检测计划内的7座桥梁分成3组进行研究,分别作为山区、平原、水库3种地理环境下桥梁的典型代表。桥梁所处水环境见表1。

表1 安徽省境内桥梁所处水环境参数

桥梁名称	水体透明度/cm	水体浑浊度/NTU	水流速度/(m·s ⁻¹)
横江大桥	200	0.82	0.35
率水河大桥	190	6.02	0.98
西淝河大桥	94	14.86	0.00
潜水7号大桥	92	9.44	0.15
高塘湖大桥	22	50.83	0.00
寿阳淮河大桥主桥	17	77.02	1.27
涡河大桥	12	148.20	0.15

3 表观损伤水下识别

现行桥梁水下基础检测方法主要有潜水检测、组合式水下摄像机检测及水下机器人检测,采用以上3种方法进行桥梁基础结构表观损伤水下识别。

3.1 表观损伤识别结果

以潜水7号大桥为例,3[#]~10[#]桥墩桩基均位于水中,11[#]桥墩桩基部分位于水中。水质较清澈,水流缓慢,河床覆盖层较坚硬(见图1)。



图1 安徽潜水7号大桥

对右幅桥进行检测,其桥墩结构见图2。这种形状桥墩的易冲蚀位置一般在桥墩两侧偏上游部位。在表观损伤水下识别时,重点关注该位置与承台附近。人工潜水检测、组合式水下摄像、水下机器

人检测结果见图3~5。

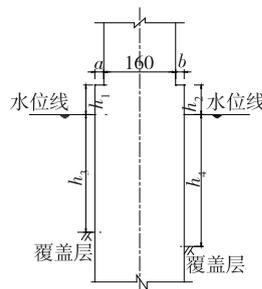


图2 安徽潜水7号大桥的桥墩结构示意图(单位:cm)

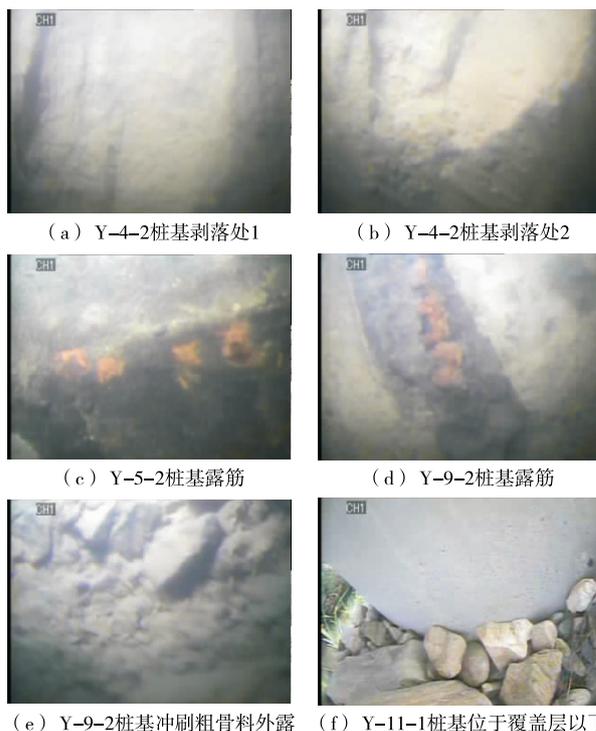


图3 人工潜水水下识别结果

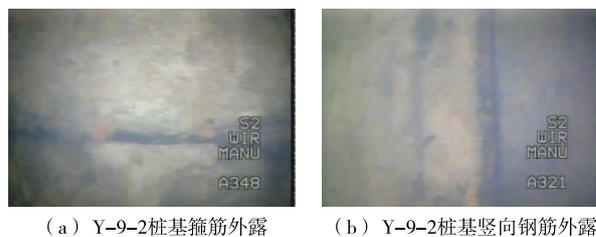


图4 组合式水下高清摄像识别结果

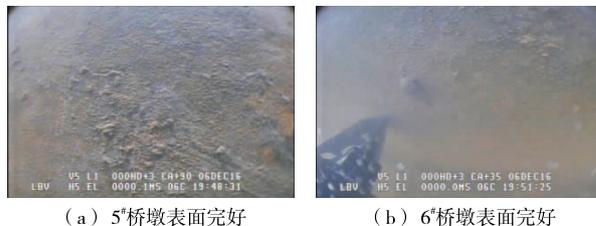


图5 水下机器人识别结果

由图3~5可知:该桥3#~11#桥墩整体状况较好,仅Y-4-2桩基存在两处轻微剥落,Y-5-2和Y-9-2桩基存在局部钢筋外露;5#、6#桥墩整体表面完好。

3.2 表观损伤水下识别方法对比

对比3种方法对多座桥梁基础结构表观损伤的识别结果,发现:

(1) 组合式水下摄像检测仪作业方法的优点在于检测速度快、成本低,且检测人员作业较安全;缺点是对检测环境要求较高,只在水质较清(水体透明度 >85 cm、水体浑浊度 <20 NTU)、基础表面无水草等微生物附着且基础在水中部分深度不超过5 m的环境下其检测效果较好。在阳光充分(如晴天12点)、水体透明度在120 cm以上、水体浑浊度在10 NTU以下时可得到优秀的图像数据;水体透明度在85 cm以上、水体浑浊度在20 NTU以下时,图像数据可满足检测要求;水体透明度在85 cm以下、水体浑浊度在20 NTU以上时,图像数据较难辨认。因此,该方法适合检测山区桥梁及平原地区中、小跨径桥梁基础,不适用于平原地区大跨径桥梁及跨海大桥的基础检测。

(2) 潜水检测的优点在于对基础附近的水质要求较低(清水、混水均可),在检测区域内可实现全方位检测、不留死角,也可对一些缺陷实现及时修补,且更换潜水装具便能承受不同的最大流速;其缺点是速度慢、费用高,难以完全保障潜水员人身安全。如在深水区域、河流湍急区域和桥下有沉船的情况下,安全事故发生的可能性较大,因而对水下作业环境要求高,作业时间也受到限制。理论上,一般情况下潜水深度不超过60 m时,待检测区域处于生命安全范围内,可对基础实施潜水检测。因此,可采用潜水检测方法对一般大桥、特大桥实施基础检测,对于水深较大的桥梁则不宜采用潜水检测方法,如大江大河上的桥梁、跨海大桥等。

(3) 水下机器人检测的优点是可深水检测,在深水检测方面与组合式水下摄像仪检测和潜水检测相比具有极大的优势;其缺点在于目前用于水下检测的机器人推进器动力不足,通常水下机器人的抗水能力为2~4节。因此,水下机器人检测基础目前仅适用于水流速度较低的跨海桥梁和库区桥梁等,对于水流速度较大的桥梁则不能实现水下机器人检测。建议在例行检查中,在水流速度不超过1 m/s时采用水下机器人检测。

4 基础冲刷水下识别

4.1 冲刷识别方法

冲刷调查是通过水下地形测量实现的。根据水下地形现状图与施工时地形图、河床资料的比较,确定河床下切量及基础掏空情况,同时为水下目视检测提供参考,找出桥梁水下基础可能存在的冲刷病害。现行基础冲刷识别方法主要有三维激光扫描、GPS结合水深仪及水下三维全景成像声呐技术。

三维激光扫描仪由高速精确激光测距仪和可引导激光以均匀角速度扫描的反射棱镜组成(见图6)。激光测距仪通过先发射激光再接受目标物表面反射信号,测量得到仪器至目标物表面的距离。对于每个扫描点,首先通过激光测距仪测量得到测站点到扫描点的直线距离,再根据扫描方向的角度得到扫描点相对于测站的空间相对坐标。如果已知测站的空间三维坐标,则可得到扫描点的三维坐标。三维激光扫描仪适合针对桩基外露的桥墩进行基础冲刷三维形态精细化识别。



图6 三维激光扫描技术

GPS结合水深仪同样可进行水下地形识别,通过确定测点与桥墩的位置,间接获取测点平面位置。使用GPS+水深仪进行水下地形测量所需主要设备包括GPS及配套设备、水深仪、仪器固定装置、水上作业平台、测距仪等。工作条件优选白天、无恶劣天气、能见度500 m以上、水面较平静、行船较少的时段。首先通过岸上作业建立GPS基准站和移动站,进行站点校正;然后进行水上作业,GPS测量员、水深仪测量员、船舶驾驶员、安全防护员密切配合,测量员负责指挥船只,保证测量时行船速度缓慢、船只沿水域横向或纵向来回行驶,直至行船轨迹覆盖全部测区,期间保证GPS测量与水深仪测量同步进行;最后利用水深仪测定的水面点距河床距离修正GPS测量的水面点三维坐标,获取对应河床测点的三维坐标,完成水下地形图绘制。

水下三维全景成像声呐系统根据基本声学测距

原理实现水下扫描。先通过声呐头发射频率为 1.35 MHz、发射频率为 40 Hz 的脉冲信号,并形成 $45^\circ \times 1^\circ$ 的扇形扫描区,发射出的每个脉冲信号均含有 256 个声学波束,各波束在垂直方向上以相同间隔排列,波束间间距为 0.178° ;目标物反射的信号由系统接收后,采用波束形成、波束指向和振幅、相位检测等技术获得 256 个点相对于换能器的相对位置,并生成二维图像;再将计算机控制云台在水平方向上旋转 360° ,获取目标物各部位的位置,得到三维图像(见图 7)。水下三维声呐全景成像系统一般由计算机、声呐接收盒和三维声呐构成,可对水下地形地貌进行扫描,建立三维模型。该系统有效探测范围的误差在 4 cm 以内,可提供基础冲刷形态的三维尺寸和分布信息。

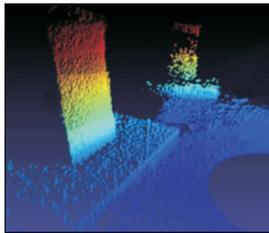


图 7 三维声学图像

根据初期勘探结果,11 月表 1 中 7 座桥和太阳河 1 号桥均处于相对枯水期。以太阳河 1 号桥、寿阳淮河特大桥、潜水 7 号大桥为例,进行以上 3 种基础冲刷识别方法的识别结果对比分析。

4.2 冲刷识别结果

4.2.1 太阳河 1 号桥冲刷识别结果

由于太阳河 1 号桥完全干涸,直接采用三维激光扫描仪进行数字扫描,通过数据处理得到基础结构的三维点云模型,同时获得基础冲刷的三维几何形态(见图 8),通过与设计图对比,该桥基础未出现严重冲刷现象。

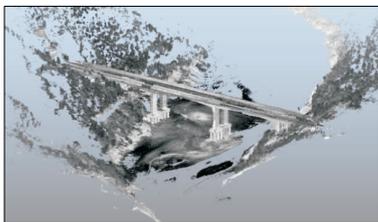


图 8 太阳河 1 号桥基础结构三维点云模型

4.2.2 潜水 7 号大桥冲刷识别结果

潜水 7 号大桥采用 GPS 结合水深仪进行水下基础冲刷识别。采用 Zenith50 GPS 获取平面坐标,

SSH 智能超声水深仪获取深度,所识别的水下地形见图 9。

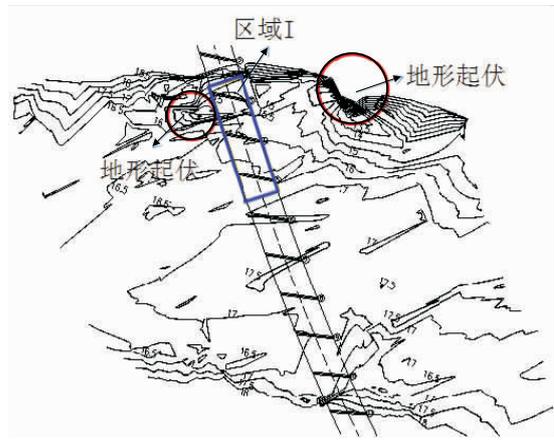
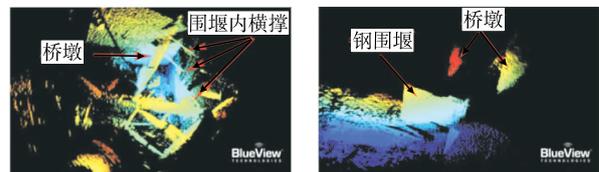


图 9 潜水 7 号大桥基础周边水下河床地形

由图 9 可知:潜水 7 号大桥基础中,区域 I 右侧有 1 个沿水流方向快速向下凹的地形。一般认为河槽中水流速度受地形影响,地形起伏大,且地势落差大,会使水流速度加快,为基础冲刷创造条件。左侧有 1 个沿水流方向缓慢下凹的地形,该区域的桥墩(3#~5#)为冲刷重点关注墩。根据施工时地形图及河床资料,该桥施工时在河道的该位置附近铺筑临时施工便道,河床状态具备发生显著冲刷的条件,故判断 3#~5# 墩已发生水下基础冲刷现象。

4.2.3 寿阳淮河特大桥冲刷识别结果

寿阳淮河特大桥施工时留下的钢围堰未完全割除,承台上有淤泥或碎石覆盖,桩基位于承台以下,不可见。所在水域水质浑浊,水流较急。由于水深、水流及环境条件的限制,无法通过潜水对基础冲刷进行有效检测,故采用水下三维全景成像声呐系统进行检测,了解水下基础冲刷形态尺寸与分布。识别结果见图 10。



(a) 2#桥墩基础声呐成像 (b) 3#桥墩基础声呐成像

图 10 寿阳淮河特大桥水下三维全景成像声呐识别结果

由图 10 可知:2# 桥墩和钢围堰紧密相连,桥基础位置颜色连续,未见可疑的声波反射、绕射现象,表明基础完好,不存在水流冲蚀现象,可判断未发生明显冲刷现象;3# 桥墩离钢围堰不远,由于钢围堰的遮挡,声波不能完全传达至桥基础处,钢围堰颜色

连续,其余位置的桥基础颜色连续,未见可疑的声波反射、绕射现象,判断基础完好,不存在水流冲蚀现象,亦可判断未发生明显冲刷现象。

采用GPS结合水深仪对该桥水下地形进行测量,验证声呐检测结论,结果见图11。由图11可知:水中基础位置等高线稀疏,基础附近未发现局部突然上升(堆积)或下降(冲蚀)现象。结合以往水下地形图等资料进行分析,该桥基础周边未见明显冲刷。

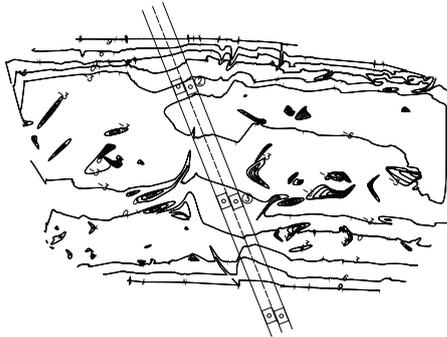


图11 寿阳淮河特大桥水下河床地形图验证

4.3 基础冲刷水下识别方法对比

根据以上冲刷识别结果,当河流完全干涸时,基础冲刷识别可按常规方法进行。如三维激光扫描仪扫描后,通过数据处理可得到结构的三维点云模型,通过与设计图对比获得桥梁基础冲刷状态、程度与分布。该方法的局限在于基础必须完全裸露,故其适合于枯水期的基础冲刷状态识别。

GPS结合水深仪是一种成熟的水下地形测量技术,通过在水面上测量点的平面坐标、在水面下用测深仪测定水深的办法得到水底地形点的三维坐标,根据各水底地形点的三维坐标绘制水下地形图,通过分析水下地形图判断桩基础冲刷情况,结合以往水下地形图等资料,得出河水对基础的冲刷淘空深度及范围。该方法具有实时性、全天候、精度高等优点。但需对桥梁基础周边一定区域的水下地形进行扫描,其冲刷识别效率并不高,无法实施冲刷状态的水下快速识别。

当水下环境复杂、存在水下危险区域或河水远超出警戒洪水位,难以保障桥梁下部结构潜水检测安全实施,但又必须检测桥梁下部结构的冲刷状态时,唯一的方法就是利用扫描声呐技术生成基础结构水下状态图像。扫描声呐技术除可利用声呐图像直接识别基础冲刷状态与形态外,还可识别基础暴露情况、填筑面积、杂物堆积和其他水下结构物缺陷。此外,在潜水前或潜水过程中,扫描声呐技术有

助于水下检测员发现潜在缺陷及绕过水下危险区域。该方法直接针对待检桥墩基础进行扫描,具有快速、高效及有针对性的特点,且对检测天气与水文环境的要求较低。随着水下声呐技术的迅速发展,声呐扫描得到的三维成像图像将越来越精确,水下基础冲刷状态识别将变得更加便利与准确。

5 结论

该文分别采用潜水检测、组合式水下摄像机检测及水下机器人进行水下基础外观损伤识别,三维激光扫描、水下声呐三维扫描、GPS结合水深仪进行桥墩基础冲刷状态与形态识别,基于多座待检桥梁的实际状态与检测环境,考虑地理环境、水流速度、浑浊度、透明度等环境和水文参数对识别效果与效率的影响,对比不同水下识别方法的适用性与有效性,给出不同基础损伤形式水下识别方法选择原则与建议。在实际应用中,需根据不同桥梁基础损伤形式及测试环境合理选择水下识别方法。

事实上,现阶段常用的水下识别技术均存在不足,现场操作与识别精度仍存在问题。需进一步进行相关技术的开发与应用研究,特别是基于上部结构动力特性变化的下部结构损伤形式与程度识别方法的研究,攻克现阶段水下操作这一技术难题。

参考文献:

- [1] 张晏方,邓勇,毕文焕,等.水下隐蔽工程检测技术在长江航道整治工程中的应用[J].水运工程,2012(10).
- [2] 陈星辰,陈斌.双频识别声呐水下影像监测系统及其应用[J].中国水能及电气化,2015(11).
- [3] 于志兵,刘亮.三峡库区桥梁深水基础施工技术[J].中外公路,2017,37(2).
- [4] 徐进军,王海城,罗喻真,等.基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J].岩土力学,2010,31(7).
- [5] 杨建明,冯寅,孙红亮,等.三维多波束实时声呐系统在桥基冲蚀探测中的应用[A].第十五届全国工程物探与岩土工程测试学术大会论文集[C].2017.
- [6] 栾涛,江锦,刘朋,等.几种新型水下检测技术在国内海洋石油工程中的应用[J].石油工程建设,2017,43(5).
- [7] 熊文,董夏鑫,唐平波,等.基于动力指纹的斜拉桥塔桥冲刷深度识别方法[J].湖南大学学报:自然科学版,2017,44(11).
- [8] 白利锋,邓丁杰,殷自成.测量机器人在高桥墩变形监测中的应用[J].公路与汽运,2013(3).