

团 体 标 准

T/CCTAS XXXX—2025

有缆水下机器人检测桥梁水下结构技术规程

Technical specification for inspection of underwater structure of bridges
based on ROV

（征求意见稿草案）

（本草案完成时间：2025 年 3 月 14 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 基本规定 2

5 仪器设备 3

 5.1 一般规定 3

 5.2 ROV 主机的基本要求 3

 5.3 水下光学摄像设备的基本要求 4

 5.4 声呐设备的基本要求 4

 5.5 水下回弹仪的基本要求 4

 5.6 水下混凝土超声波检测仪的基本要求 4

 5.7 水下钢筋扫描仪的基本要求 5

6 检测内容 5

 6.1 检测方案 5

 6.2 主要检测内容 6

 6.3 检测方法 7

7 检测作业 7

 7.1 一般规定 7

 7.2 准备工作 8

 7.3 作业流程及要求 8

8 检测报告 13

 8.1 总体要求 13

 8.2 内容及要求 14

附 录 A （资料性） 桥梁水下结构表观缺陷检查记录推荐用表 15

附 录 B （资料性） 水下构件自编号推荐方法 16

附 录 C （资料性） 水下墩桩构件检测推荐路径 17

附 录 D （规范性） 数据处理 18

参 考 文 献 22

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会交通工程设施分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

有缆水下机器人检测桥梁水下结构技术规程

1 范围

本文件规定了有缆水下机器人检测桥梁水下结构技术的范围、规范性引用文件、术语和定义、基本规定、仪器设备与技术要求、检测内容和检测方式。

本文件适用于公路、城市和铁路桥梁水下结构的检测工作。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 36896.1 轻型有缆遥控水下机器人 第 1 部分：总则
- GB/T 44253 巡检机器人安全要求
- GB/T4208 外壳防护等级（IP 代码）
- GB/T38244 机器人安全总则
- GB/T 36896.4 轻型有缆遥控 ROV 第 4 部分：摄像、照明与云台
- JTG 5120 公路桥涵养护规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- CJJ 99 城市桥梁养护技术标准
- JG/T5004 混凝土超声波检测仪
- JGJ-T23-2011 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程
- JGJ/T 152 -2019 混凝土中钢筋检测技术标准
- CECS21:2000 超声法检测混凝土缺陷技术规程
- DB11/T365-2006 电磁感应法检测钢筋保护层厚度和钢筋直径技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1 桥梁水下结构 underwater structure of bridge

位于常水位以下的桥梁结构构造物，如桥墩、桥台、承台、桩、沉井、扩大基础及海/河床等。

3.2 有缆水下机器人 ROV (Remotely operated vehicle) (以下简称 ROV)

一种通过电缆（通常为脐带缆）由水面操作员远程操控的水下设备，由水下部分、脐带缆和水面部分组成。水下部分由主体结构、浮力部件、传感器、控制器、供配电、通信、螺旋桨推进器、水下摄像系统与云台和配套功能模块等组成；水面部分由水面控制单元、水面监控站和收放系统等组成。

3.3 冲蚀 erosion

因水流冲刷引起的结构局部破损。

3.4 腐蚀 corrosion

水下结构因水域中腐蚀介质作用而引起的材料性能退化或破坏。

3.5 成像声呐 imaging sonar

利用声波对水下目标进行成像的声学设备。

3.6 缺陷 defect

指桥梁水下结构中存在的可能影响正常功能或潜在安全隐患的各种问题，包含但不限于结构表面损伤、内部缺陷、尺寸偏差、材料劣化等。

4 基本规定

4.0.1 桥梁水下结构应进行定期检测，其频率不应低于桥梁定期检测频率，且应每年至少进行 1 次。对位于重要河道、水流湍急、河床冲刷快、基础埋置浅、水质腐蚀强处的桥梁，以及危病桥梁、所处河段采砂或山区季节性河流的桥梁宜提高检测频率。

4.0.2 应开展桥梁水下结构检测的情形如下：

- a) 新建、改建或加固后的各类桥梁；
- b) 经常检查、定期检查中发现不合格的桥梁或危桥；
- c) 在加固改造方案设计前墩台基础长期位于常水位以下的桥梁；
- d) 遭受洪水、流冰、泥石流、地震、撞击或其他异常情况，可能造成墩台基础损伤的桥梁；
- e) 结构损伤或病害可能是由于水下结构缺陷所引起的桥梁。

4.0.3 桥梁水下结构的定期检测内容应包括表观缺陷检测和混凝土强度无损检测。若表观缺陷检测过程中发现缺陷较多、混凝土强度检测过程中初判混凝土强度推定值过低，或出现 4.0.2 所述必须立即开展桥梁水下结构检测的情形，则需要在定期检测的基础上再对水下结构的内部进行探伤。

4.0.4 桥梁水下结构检测应根据检测要求范围、内容、精度，选择合适的 ROV，搭载合适的功能模块。水下结构表观缺陷宜优先选用光学成像设备，水环境浊度较大且表观缺陷尺寸较大时也可选用前视声呐，基础冲刷及河床断面检测宜选用多波速测深声呐。

4.0.5 实施桥梁水下结构检测的人员应具备公路、铁路或市政以及其它行业相应的资格和能力。

4.0.6 水下机器人可在高危险、被污染以及低可见度的水域环境下工作，配备声呐系统、摄像机、照明灯、定位传感器和机械臂等装置，可以完成实时视频传输、声呐图像绘制、水下定位、水下取样、接触检测等各种专业操作。

4.0.7 桥梁水下结构检测应根据检测的内容和精度要求选择合适的搭载于 ROV 的功能模块，检测设备的适用范围、精度以及技术参数应符合本规程“5 仪器设备”和有关标准的规定。

4.0.8 ROV 主机、摄像头、声呐、定位传感器、机械臂、回弹仪、超声波检测仪、钢筋扫描仪等设备应定期进行检定或校准，检测前应对设备功能进行核查。

4.0.9 当采用新的技术、设备和检测方法时，应符合下列规定：

- a) 仪器设备技术参数应经过科技成果鉴定或经检定/校准；
- b) ROV 检测方法应与成熟的方法进行比对试验；
- c) 仪器设备具有相应的检测细则或作业指导书，并提供测试误差或测试结果的离散度。

5 仪器设备

5.1 一般规定

5.1.1 桥梁水下结构检测采用的 ROV，分为主机和功能模块两大部分。主机及功能模块必须具有产品合格证、有效期内的检定或校准证书，并在仪器的明显位置上有名称、型号、制造商、出厂编号、出厂日期等标识。

5.1.2 ROV 的主机由推进器、控制舱、供电系统、机身框架、数据采集系统、功能模块搭载平台、线缆以及控制平台等部分组成，可以在桥梁检测工程师的操作下，潜入水中目标位置获取各类数据。

5.1.3 ROV 的功能模块应包括但不限于光学摄像头、声呐、回弹仪、超声波检测仪、钢筋扫描仪、水下定位系统、机械臂、取样器等。

5.1.4 ROV 的主机及功能模块应定期进行检定或校准，确保仪器的各项功能满足要求。运输过程中应避免仪器设备剧烈震荡或磕碰，轻拿轻放；应根据使用情况及时进行清洁维护和定期保养。

5.1.5 功能模块的维护应符合相关规范的要求；功能模块的防水等级不得低于 ROV 主机；功能模块与 ROV 可协同工作。

5.1.6 ROV 的检测功能宜包括：桥梁水下结构表观缺陷检测、水下结构倾斜度检测、钢构件焊缝检测、螺栓松动检测、河床地形扫描、混凝土强度检测、混凝土构件内部缺陷检测、钢筋位置检测、钢筋的混凝土保护层厚度检测、水下环境样品采集等。

5.1.7 桥梁水下结构检测仪器设备的选择应根据检测内容来确定，对于桥梁水下结构表面细微缺陷宜选择高分辨率摄像机进行光学成像检测，较大缺陷可使用前视声呐进行声学成像检测。桥梁墩台基础冲刷及河床断面冲刷宜选择多波速声呐进行检测或三维实时声呐系统检测。

5.2 ROV 主机的基本要求

5.2.1 用于桥梁水下结构检测的通用 ROV 主机应能满足表 5.2.1 的要求。

表 5.2.1 ROV 主机基本参数表

名称	参数
机身结构	重量（含标配电池）≥15kg，搭载能力≥5kg，具有功能模块固定接口
防水等级	不低于 IP68
续航	≥2 小时
使用环境	江河、湖泊、水库、沿海
最大潜深	≥100m
航速	≥1.0m/s，至少 4 档调速
抗扰流	≥0.8m/s
照明	流明度≥1500lm
可实现姿态	上浮下潜、前进后退、左右平移、仰视 30°、俯视 30°， 仰俯视可通过摄像头云台实现
摄像机	≥720P

深度传感器精度	不低于 0.1m
温度传感器精度	不低于 1℃
角度测量精度	不低于 1°
控制线缆长度	≥150m
多功能拓展坞	最少能同时支持 3 个功能模块共同工作，并能兼容回弹仪、超声仪、钢筋扫描仪等接触式检测功能模块

5.2.2 该通用 ROV 主机机械安全、电气安全满足 GB/T38244 中的规定。

5.3 水下光学摄像设备的基本要求

5.3.1 水下光学摄影功能模块应具备足够的抗水压能力，防水等级不低于 IP68 级。

5.3.2 云台应满足 GB/T 36896.4 中的规定。

5.3.3 光学摄像设备应具备边录像边拍照和 EIS 防抖功能。照片分辨率和流畅度≥1080P，视频分辨率≥720P，流畅度≥30Fps，视频最大码流≥60M。

5.3.4 视频存储量≥128G。

5.4 声呐设备的基本要求

5.4.1 声呐功能模块应具备足够的抗水压能力，防水等级不低于 IP68 级。

5.4.2 检测前应根据水下检测项目对测量范围、精度、分辨率以及实际检测环境等要求选择合适的声呐。

5.4.3 设备表面涂覆层应均匀、牢固，换能器橡胶单元不可老化或变形。

5.4.4 设备的适用范围、精度以及技术参数应满足检测的要求。

5.4.5 声呐检测设备使用时应注意降温，应尽可能浸水使用，避免设备过热。

5.4.6 声呐检测设备应定期进行检定或校准，检测前应对设备各项功能进行核查。

5.4.7 声呐检测设备的检定周期一般不超过 1 年。

5.4.8 声呐应满足 ROV 的搭载能力以及正常工作要求。

5.4.9 水下结构检测应做好记录和数据存储，记录的内容符合检测项目的要求。

5.5 水下回弹仪的基本要求

5.5.1 水下回弹仪是在普通数显回弹仪进行防水和通讯改造后的仪器，应具备足够的抗水压能力，防水等级不低于 IP68 级。

5.5.2 水下回弹仪应按《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ_T23-2011 的相关规定进行自校准与保养。

5.5.3 水下回弹仪安装前需确保回弹仪内部水密良好，回弹值的示数正常。

5.5.4 回弹仪的弹击杆在整个压缩弹击过程一直处于 ROV 整体最前端，保证其始终处于 ROV 观测成像区域内。

5.5.5 应安装强制复位装置，确保回弹仪在弹击过程中不会发生明显的晃动、错位、偏移或倾斜。

5.6 水下混凝土超声波检测仪的基本要求

5.6.1 水下超声波检测仪是在混凝土超声波仪基础上进行防水和通讯改造后的仪器，应具备足够的抗水压能力，防水等级不低于 IP68 级。

5.6.2 水下超声波检测仪应符合《混凝土超声波检测仪》JG/T5004 的规定。

5.6.3 水下超声波检测仪可按《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》T / CECS 02-2020 的有关规定进行自校准与保养。

5.6.4 水下超声波检测仪检测完毕，应擦干仪器表面的水分、杂质，放入机箱内，并存放在通风、阴凉、干燥处。

5.6.5 换能器搭载于 ROV 上应符合下列规定：

- a) 换能器通过搭载平台搭载于 ROV 上，检测员能在陆上测读数据；
- b) 换能器前端需保证始终处于 ROV 观测成像区域；
- c) 确保安装和连接过程中所有螺栓紧固，避免在水下操作过程中出现松动或脱落的情况；
- d) 定期检查换能器的状态，确保其完好无损，特别是保持换能器的水密性；
- e) 若发生故障，如换能器搭载不稳定、检测数据异常等，需及时检修和更换相应部件。

5.7 水下钢筋扫描仪的基本要求

5.7.1 水下钢筋扫描仪是在现有一般钢筋扫描仪为基础进行防水和通讯改造后的仪器，应具备足够的抗水压能力，防水等级不低于 IP68 级。

5.7.2 水下钢筋扫描仪应按《电磁感应法检测钢筋保护层厚度和钢筋直径技术规程》DB11/T365-2006 与《混凝土中钢筋检测技术标准》JGJ/T 152 -2019 的相关规定进行自校准与保养。

5.7.3 水下钢筋扫描仪每次检测后应及时清理钢筋扫描仪表面杂物与水分，并存放于通风、阴凉、干燥处。

5.7.4 检测前应根据水文资料确定待检测构件的水下环境，检测位置应当选择无杂物干扰位置，同时避开附近的金属物。

5.7.5 检测前根据待测构件的尺寸、面积大小等参数并结合水深来确定测区的位置和测区数量。

5.7.6 钢筋扫描仪搭载于 ROV 应符合以下规定：

- a) 钢筋扫描仪探头通过搭载平台安装于 ROV，检测员能在陆上测读数据；
- b) 钢筋扫描仪探头应做好防水措施，避免进水；
- c) 钢筋扫描仪搭载及固定应当牢固，避免进行水下作业时探头脱落；
- d) 钢筋扫描仪搭载于 ROV 时，探头应能进行角度调整；
- e) 钢筋扫描仪搭载于 ROV 时，应避免阻挡机器人视野；
- f) 每次进行搭载检测前，应检测连接部分的紧固性、钢筋扫描仪探头的状态及水密性；
- g) 发生异常时，及时更换导致钢筋扫描仪探头及搭载平台异常或损坏的零部件。

6 检测内容

6.1 检测方案

6.1.1 制定桥梁水下结构的检测方案前应根据检测项目搜集桥梁信息资料、设计资料、竣工资料、尤其是桥梁所在水域的水文资料、历次检测及加固维修资料。必要时需要对现场测试位置和情况进行踏勘和调研。

6.1.2 检测方案应根据目的、内容以及要求制订，其内容包括但不限于以下内容：

- a) 桥梁概况包括桥梁的基本信息、桥梁设计及竣工资料、所在水域的水文资料、与水下结构相关的历次检测及维修加固资料等；
- b) 桥梁水下结构检测的目的、内容、技术要求和检测依据；
- c) 桥梁水下结构检测的范围、检测内容及检测方法；
- d) ROV 主机选型；

- e) ROV 功能模块及辅助设备的选取;
- f) 检测路径规划;
- g) 检测进度计划;
- h) 水上安全保证措施及通航航道的水上交通组织方案;
- i) 质量保障措施。

6.1.3 总体流程应按照图 6.1.1 执行。

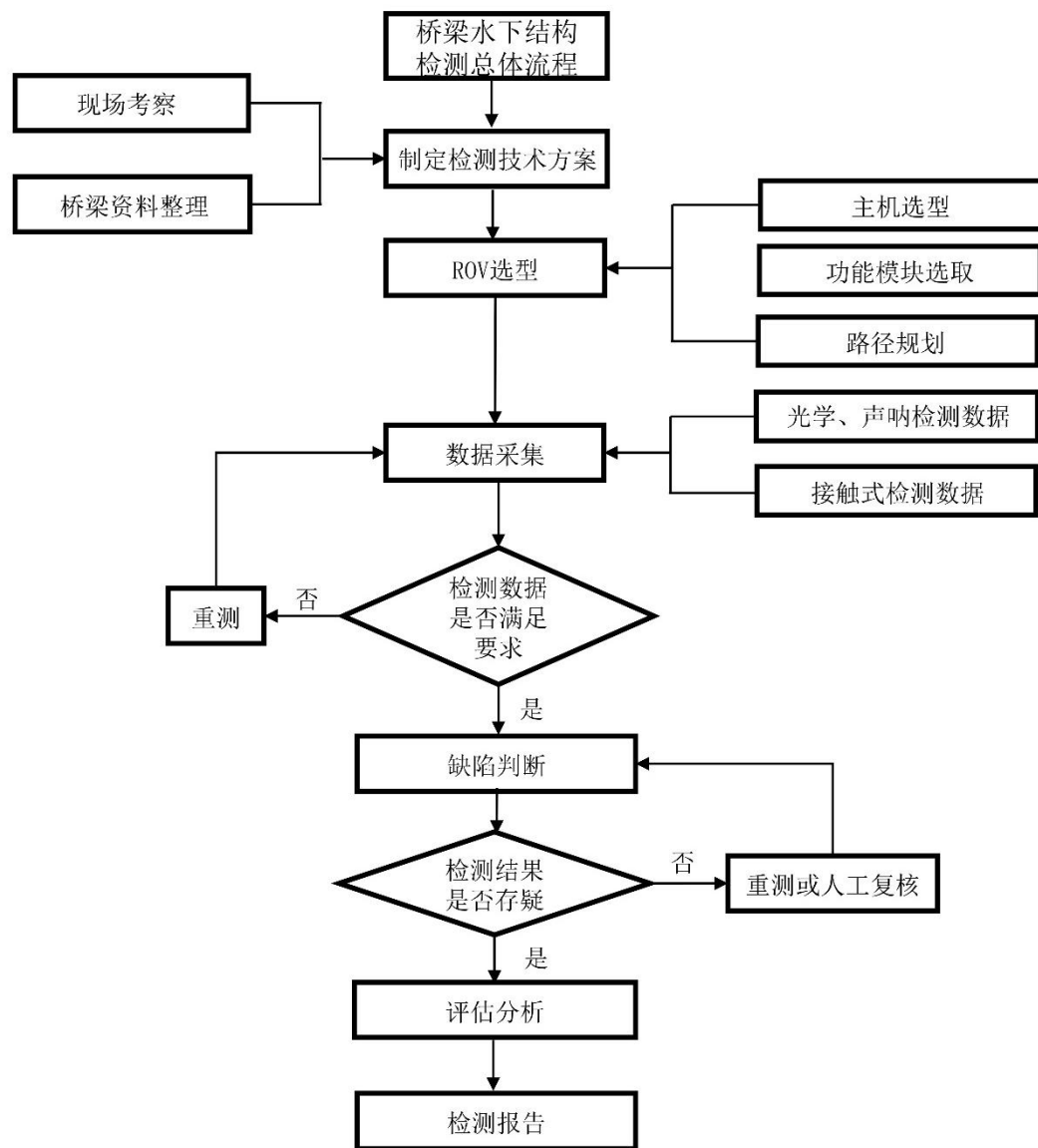


图 6.1.1 ROV 检测桥梁水下结构总体流程

6.2 主要检测内容

6.2.1 表观缺陷检测，包括以下内容：

- a) 水下混凝土构件表观缺陷，主要包括开裂、保护层剥落、破损、露筋、空洞、孔洞、麻面、冲蚀、钢筋锈蚀、析钙和倾斜等；
- b) 水下圬工构件表观缺陷，包括砌体破损、剥落、松动、变形、裂缝、灰缝脱落等；
- c) 水下钢构件表观缺陷，包括构件涂层劣化、锈蚀、焊缝开裂、裂纹，螺栓（铆钉）松动与缺失等；
- d) 基础冲刷和淘空。

6.2.2 内部缺陷检测，包括水下混凝土与圬工结构的空洞、不密实区域和裂缝深度等检测。

6.2.3 基础冲刷检测包括：水位以下墩台、基础周围的冲刷以及基础淘空等缺陷。桩基础冲刷检测，包括冲刷范围、深度、基桩暴露长度；扩大基础冲刷检测，包括冲刷范围、最大冲刷深度、基础埋置深度以及基底是否淘空，淘空范围等。

6.2.4 河床断面测量包括：检测桥下通航线路和桥梁上、下游一定范围内河床的冲淤和地形的变迁情况。

6.2.5 其他检测内容包括：混凝土强度、水体浑浊度、流速、钢筋混凝土保护层厚度、钢筋直径、钢筋位置检测。

6.3 检测方法

6.3.1 宜采用光学成像设备对精度要求较高的表观缺陷进行检测，如使用水下摄像系统对裂缝宽度进行检测；对于面积较大的表观缺陷宜采用声学设备进行检测，如使用前置二维成像声呐对大面积剥落进行检测。

6.3.2 内部缺陷检测宜使用 ROV 搭载超声波换能器，当进行不密实区和空洞检测时，当构件具有两对相互平行的测试面时，可采用对测法；当构件只有一对相互平行的测试面时，可采用对测和斜测相结合的方法。当进行裂缝深度检测时，构件的裂缝部位只有一个可测表面，估计裂缝深度又不大于 500mm 时，可采用单面平测法；当构件的裂缝部位具有两个相互平行的测试表面时，可采用双面穿透斜测法检测。

6.3.3 进行基础冲刷检测时宜利用 ROV 搭载多波束测深声呐检测。检测时应对 ROV 主机进行姿态补偿修正，通过后处理软件生成基础周围三维水下地形图像，根据坐标信息和范围，记录基础冲刷位置与最大冲刷深度、淘空缺陷的体积等，分析缺陷成因，并预测发展趋势。当检测精度要求较高或声呐检测结果存疑时，则需要采取水下光学摄像设备对其进行近距离的复核。

6.3.4 河床断面测量宜根据桥梁水文地质条件，在梁上、下游一定范围内采用多波束测深声呐对河床断面进行检测，应按照规定航线或测线进行数据采集，并对 ROV 主机进行姿态补偿修正，通过后处理软件生成河床三维地形图像，根据桥梁河床冲刷情况，可绘制多个河床横断面图。

6.3.5 混凝土强度检测：可利用水下超声仪和水下回弹仪测取构件的声速和回弹值，然后利用水下专用强度曲线计算构件的强度推定值。

6.3.6 水体浑浊度检测：采集桥梁水下结构周围水体样本，并通过水体浑浊度仪测定其浑浊度值，并对检测数据进行必要的修正。

6.3.7 流速检测：采用流速仪测量桥梁水下结构所在水域的水流速度。

6.3.8 钢筋混凝土保护层厚度、钢筋直径和钢筋位置检测：采用水下混凝土钢筋扫描仪对钢筋及其保护层厚度进行扫描测量。

7 检测作业

7.1 一般规定

7.1.1 检测作业应经航道部门的批准后方可开展。

7.1.2 当遇到大雾、大潮、烈风、雷雨、暴雨、暴雪等恶劣天气时，不能作业。

7.1.3 检测过程中，桥梁检测工程师必须监督设备运行情况和记录重点缺陷位置，检测报告必须由具有执业资格的桥梁检测工程师复核，以确保无漏检或误判。

7.1.4 为保障作业安全，检测人员宜乘坐水面辅助船，靠近被检测桥墩进行作业。条件允许时，也可以在岸边或桥上进行作业。

7.1.5 采用 ROV 进行构件尺寸检测，可通过光学成像或声呐成像对构件尺寸，以及缺损的位置和范围进行测量。

7.2 准备工作

7.2.1 实施桥梁水下结构检测前，应搜集桥梁基本信息资料、水文情况、勘察设计资料、水下障碍物情况、水深地形图、历次检测及维修加固的资料，并进行现场探勘，核对桥梁基本信息。

7.2.2 对水中构件进行编号。如有竣工资料，则应按竣工资料的方式进行编号。

7.2.3 确定检测顺序。宜先对靠近岸边、小里程编号的水下结构进行检测。

7.2.4 根据上述准备工作获取的资料和决策内容，编制桥梁水下结构检测的专项检测方案。

7.3 作业流程及要求

7.3.1 ROV 主机应先搭载视觉或声呐功能模块，对检测对象进行表观缺陷检测，了解检测对象的总体情况和主要结构缺陷。

7.3.2 ROV 下水前，必须按设备使用要求进行连接、调试和自检，确保设备无明显破损，供电、通讯、防水等基本功能均正常。调试 ROV 系统的控制参数，包括稳定性参数、检测路径规划、声呐扫描方式、摄像头采样参数等。

7.3.3 采用垂绳、激光测距仪、水面辅助船等工具，测量水面距离梁底距离 H ，并记录在附录 A《桥梁水下结构表观缺陷检查记录推荐用表》。

7.3.4 ROV 下水时，应确保其平稳轻放，并注意缆绳的布置与固定，防止因缆绳缠绕、过紧或磨损导致设备损坏。操作时，检测人员宜在船上进行作业，以保证安全与工作效率，也可以选择桥上或岸边作业。

7.3.5 ROV 下水后，可通过声呐设备测量，或利用其自带的深度传感器沿河底测量，以获取当前编号水下结构所在河床的水深 D ，并记录在附录 A。

7.3.6 采取环绕扫测法或垂直扫测法对检测对象进行全历遍扫测。水下摄像机多为高清变焦镜头，应根据 ROV 搭载的摄像机焦距参数，调整物距（即被测物与镜头之间的距离），以确保成像清晰。建议先以固定物距扫描被测构件，捕捉到缺陷后，根据缺陷类型，动态调整物距和焦点，使被拍摄物位于焦距内并保持清晰成像，从而获得完整影像和细节特征。检测结果应按照附录 A 记录缺陷特征和缺损情况。

7.3.7 水下结构表观缺陷的位置宜按以下规定进行定位，并采用附录 A 进行记录：

- a) ROV 朝向记录。当 ROV 发现缺陷时，利用其搭载的陀螺仪读取 ROV 水平方向角 φ （单位：°，以下简称方向角）；
- b) 缺陷水深记录。通过 ROV 的定深功能，测量并记录河床的水深 D ；当发现缺陷时，ROV 的所在水深与缺陷所在水深一致，因此，可将 ROV 发现缺陷时的水深记录为缺陷所在水深 d ；
- c) 缺陷发现时间或照片编号记录。通过显示屏所显示的拍摄时间或照片编号，记录缺陷发现时间或对应照片的编号。

7.3.8 桥梁水下结构采用光学成像设备进行检测时，应符合下列规定：

- a) 应逐一对桥梁水下结构进行全遍历无遗漏检测；
- b) 光学成像设备检测水下结构时，应对测试的整个水下结构进行环绕拍摄，覆盖结构所有部位，并确保合适的拍摄角度和清晰的成像效果，避免漏检和误检；
- c) 在路径规划范围内，若自动采集的数据存在低质量图像时，应手动控制 ROV 重新采集，保证图像的清晰度；
- d) 在弱光照、高浑浊度水体中采集数据时，应配备多源异构图像增强系统（MSH）、LED 照明灯等辅助设备，并对图像进行对比度增强、去噪、色彩校正等后处理。

7.3.9 桥梁水下结构采用声呐成像设备进行检测时，应符合下列规定：

- a) 应逐一对需检测的对象进行检测；
- b) 应对目标水下结构周围进行圆形或半圆形扫测，声呐成像范围应覆盖水下结构部分；
- c) 当声呐垂直波束角开角无法覆盖水下结构部分时，应覆盖不同深度水域进行 ROV 路径规划；
- d) 声呐系统检测前，应对系统功能进行核查。正式测试前，应先将测试系统放入水中进行连接和调试，确保系统工作正常后方可开始检测。

7.3.10 根据检测方案和非接触式表面缺陷检测结果，选取状况较差的构件作为接触式检测的对象进行检测。

7.3.11 采用合适的 ROV 主机搭载水下回弹仪，参考《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ-T23-2011，对选定的混凝土构件进行回弹值测量，并且符合以下规定：

- a) 下水前检查强制复位装置是否工作正常，确保回弹仪在弹击时能与被检测面保持垂直；
- b) 每一结构或构件的测区数不应少于 10 个，对于某一方向尺寸小于 4.5m、且另一方向小于 0.3m 的构件，其测区数量可适当减少，但不应少于 5 个；
- c) 一个深度为一个测区，每块测区需至少随机选取 20 个测点，控制 ROV 携带水下回弹仪以 0.5m/s 的行驶速度撞击测区，实现对测点的弹击，并由回弹仪记录对应的回弹值，操作流程如图 7.3.1；
- d) 相邻两测区的间距应最大不超过 2m，测区离构件端部或施工缝边缘的距离不大于 0.5m，且不小于 0.2m；
- e) 回弹仪处于水平方向对构件的检测面进行弹击；
- f) 测区宜选在构件的两个对称可测面上，也可选在一个可测面上，且应分布均匀。在构件的重要部位或薄弱部位，必须布置测区，并应避开预埋件。

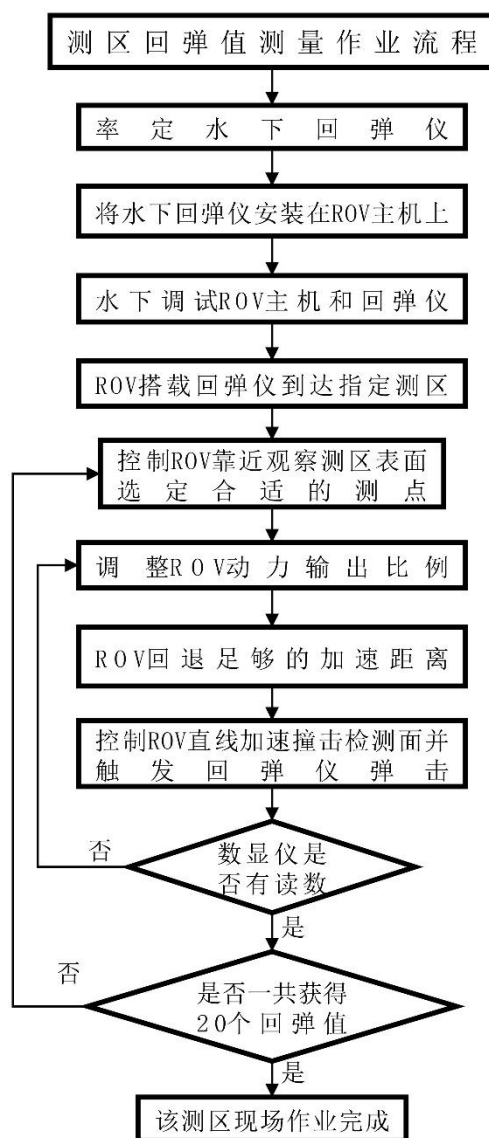


图 7.3.1 回弹法检测水下结构混凝土强度测区回弹值测量现场作业流程图

7.3.12 选择合适的 ROV 主机，搭载水下超声仪，根据不同检测目的，参考《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》T/CECS 02-2020 和《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS21:2000，按图 7.3.2 的流程对构件进行超声波声时、波幅或主频的测量，且符合以下规定：

- 对于圆柱体构件，可以通过 ROV 的陀螺仪测得的 ROV 水平方向角 φ 实现对测，并且以构件圆形截面的直径为超声波传播距离；
- 对于立方体构件，可以通过声呐获得的构件轮廓极坐标图，对测点位置进行定位，复核构件尺寸是否与设计竣工资料相符，并通过定位数据和构件尺寸数据，确定声波传播的距离；
- 在采用超声法进行强度测量时，以一个深度为一个测区，每一结构或构件的测区数不应少于 10 个，对于某一方向尺寸小于 4.5m 且另一方向小于 0.3m 的构件，其测区数量可适当减少，但不应少于 5 个；相邻两测区的间距应最大不超过 2m，测区离构件端部或施工缝边缘的距离不大于 0.5m，且不小于 0.2m；

- d) 在采用超声法进行内部缺陷时检测，构件的被测部位应满足被测部位应具有一对（或两对）相互平行的测试面，测试范围除应大于有怀疑的区域外，还应与同条件的正常混凝土进行对比，正常混凝土对比测点数不应少于 20；
- e) 采用超声法进行内部缺陷可按图 7.3.3 所示方法在测试部位两对相互平行的测试面上以 100~300mm 的等间距方式进行布点，采用对测法进行声时、波幅或主频的测量。当构件只有一对相互平行的测试面时，可按图 7.3.4 所示在对测的基础上进行交叉斜测。

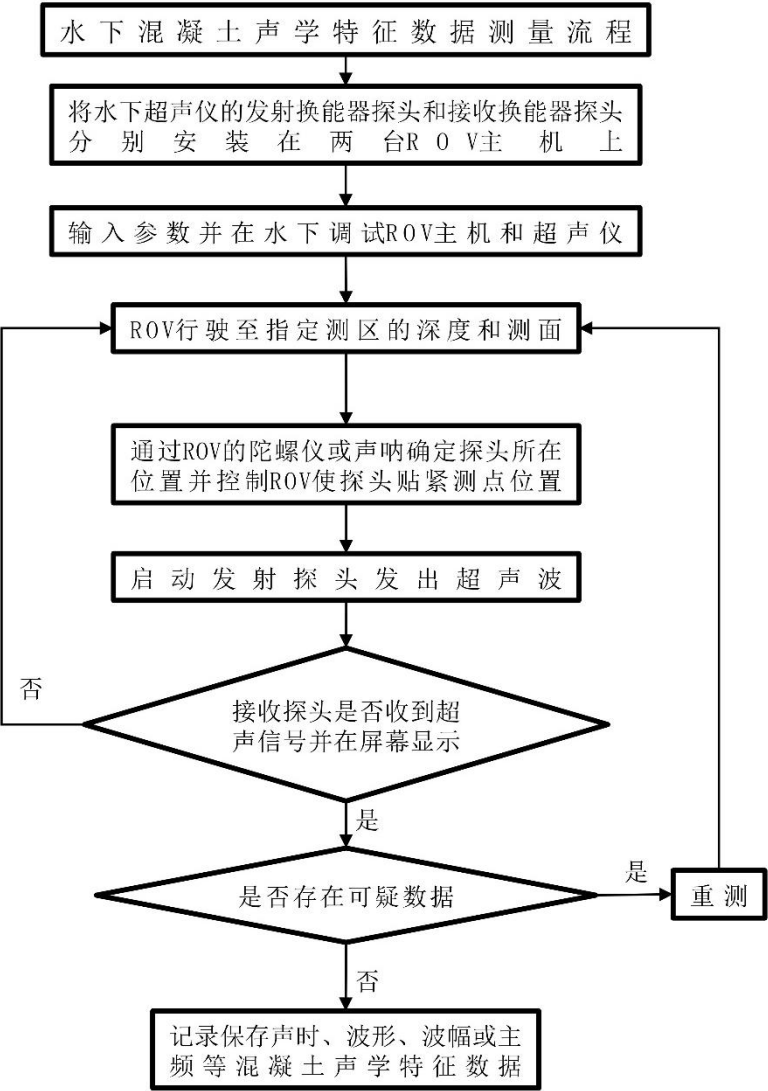


图 7.3.2 水下混凝土超声值测量现场作业流程图

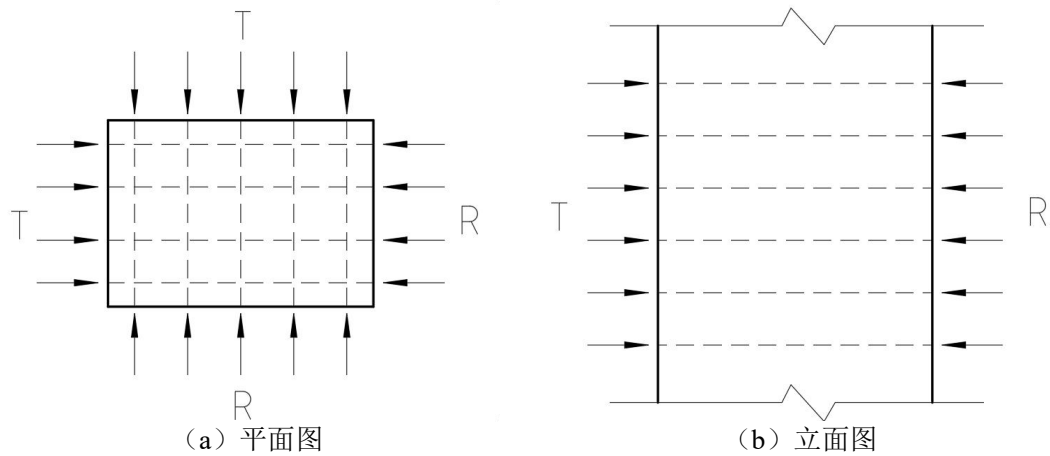


图 7.3.3 对测法示意图

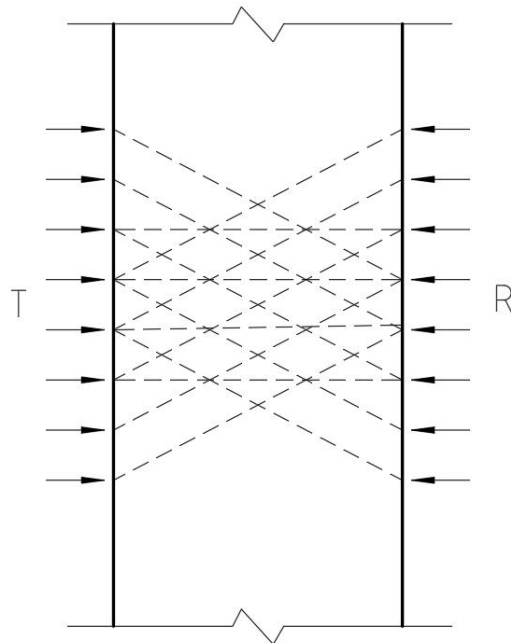


图 7.3.4 斜测法立面图

7.3.13 选择合适的 ROV 主机，搭载水下钢筋扫描仪，按图 7.3.5 的流程，检测水下钢筋混凝土结构保护层厚度及钢筋位置，且符合以下规定：

- 对待检测桥梁进行现场勘探，确定待检测结构情况及作业地点；
- 应根据整理后的桥涵设计资料对钢筋扫描仪的钢筋直径、相邻钢筋间距、多层钢筋及箍筋等相关参数进行设定，并检测钢筋扫描仪探头的水密性。
- 下水检测前，应根据待检测结构的检测面形状结合待检测钢筋的布置情况转动搭载装置让钢筋扫描仪探头轴线平行于待检测钢筋轴线，并保持探头固定，避免水流冲击、杂物干扰及撞击引起其角度变化；
- 将钢筋扫描仪探头搭载于 ROV，探头远离金属等导磁介质区域进行空测调零校准。校准后，控制 ROV 贴近结构的待检测区，通过摄像头观察探头与检测面的贴合及平行情况。若贴合和平行情况较差时，则重复该项流程；若情况良好，则对检测面进行预扫描；

- e) 应根据预扫描结果大致确定钢筋埋深及分布情况并设定仪器量程范围。ROV 缓慢移动使探头在预扫描的基础上沿垂直钢筋轴线进行往返扫描。若往返检测数据在误差范围，则确定该测区的钢筋位置及保护层厚度值。否则，重复 c、d 两步流程；
- f) 若结构检测完成，则根据检测数据确定水下混凝土结构的保护层厚度及钢筋位置。结构未检测完成时，控制 ROV 移动到下一测区，并重复 b、c、d、e 四步工作；
- g) 通过 ROV 的定深功能进行定位，按照水深划分测区，以一个深度为一个测区。深度以 ROV 水深计读数为准；
- h) 每个测区随机选取 3 个测点进行测量，每个测点间距大于等于 20cm，以 3 个测点中的保护层厚度最小值为该测区的代表值；
- i) 一定区域内检测出的保护层厚度最小示值或检测信号强度最大示值对应为该钢筋的保护层厚度且该处也为钢筋所处位置。

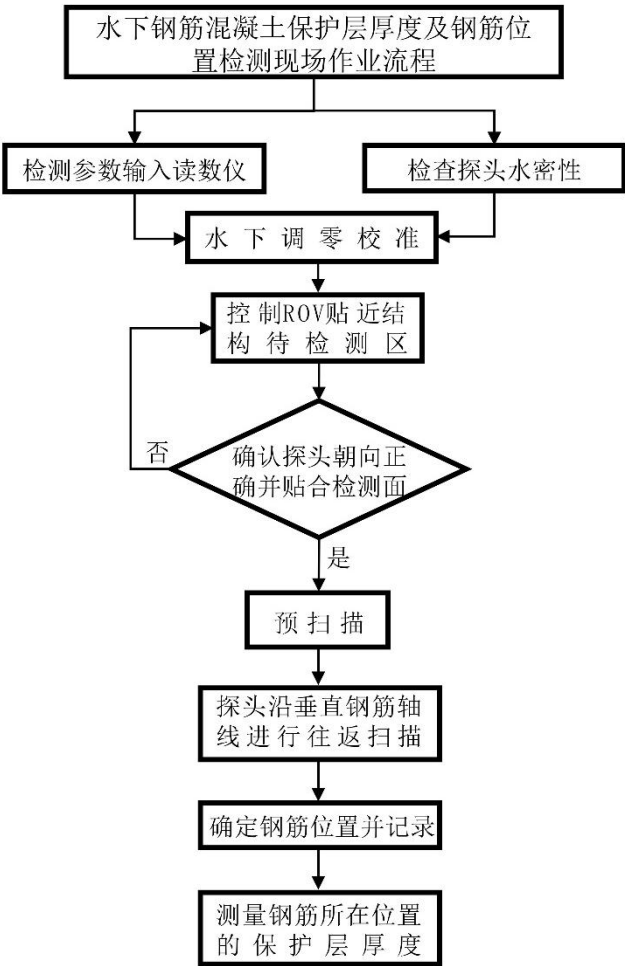


图 7.3.5 水下钢筋混凝土结构钢筋扫描现场作业流程图

8 检测报告

8.1 总体要求

检测报告必须提供完整的检测数据，所发现的缺陷必须按规范进行准确描述。

8.2 内容及要求

8.2.1 报告内容应包括但不限于以下内容：

- a) 桥梁概况，包括桥梁的基本信息、设计及竣工资料、所在水域的水文资料、与水下结构相关的历次检测及维修加固资料等；
- b) 桥梁水下结构检测的目的、内容、技术要求和检测依据；
- c) 桥梁水下结构检查的范围、检测内容及检测方法；
- d) ROV 和所用功能模块的厂家、型号、功能、特点和性能指标；
- e) 其他检测仪器设备及辅助设备；
- f) 表观缺陷检测结果；
- g) 接触式检测结果，如钢筋位置及其混凝土保护层厚度、内部缺陷探测结果、混凝土强度检测数据及其强度推定值等；
- h) 本次检测结果与历史检测结果对比分析；
- i) 缺陷成因分析；
- j) 总体结论。

8.2.2 对裂缝的描述，除常规的最大宽度、长度，还应提供裂缝宽度随长度变化的曲线图。

8.2.3 对于混凝土剥落、麻面缺陷，应提供缺陷面积数据。

8.2.4 报告应提供全套的电子资料。

附 录 A
(资料性)

桥梁水下结构表观缺陷检查记录推荐用表

外业检测过程中，推荐用表 A.1 对缺陷的位置和状况进行记录。

表 A.1 桥梁水下结构表观缺陷检查记录推荐用表

1. 桥梁名称					2. 水下结构类型	
3. 水下结构编号					4. ROV型号	
5. 检测时间					6. 天气与气温	
7. 所在河床水深D（m）					8. 水面距离梁底距离H（m）	
序号	构件编号 与类型	病害位置			缺陷类型	缺陷描述
		方向角 φ （°）	水深d（m）	拍照时间或 照片编号		
备注：						
测试：		记录：		复核：		

附录 B
(资料性)
水下构件自编号推荐方法

B.1 左右侧划分方法

桥梁从小里程至大里程方向划分桥梁的左、右侧，如图 B.1。

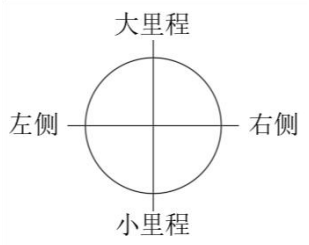


图 B.1 水下构件左右侧划分示意图

B.2 自编号推荐方法

墩柱编号由所在的“轴号”-“墩柱号”两部分组成，先填写桥墩所在轴号，再按从左至右的顺序对每一墩柱进行编号，如图 B.2a 的 1-1#墩柱，1-2#墩柱。

承台编号由所在的“轴号”-“承台号”两部分组成，先填写桥墩所在轴号，再按从左至右的顺序对承台进行编号，如图 B.2a 和图 B.2b 的 1-1#承台。

对于扩大基础、沉井基础等比较大型的基础，可以参考承台的编号方法；对于多排的群桩基础，由所在的“轴号”-“桩号”两部分组成，先填写对应桥墩的轴号，再按从左至右，从上至下的顺序对每一根桩基进行编号，如图 B.2b 的 1-1#~1-4#桩基础。

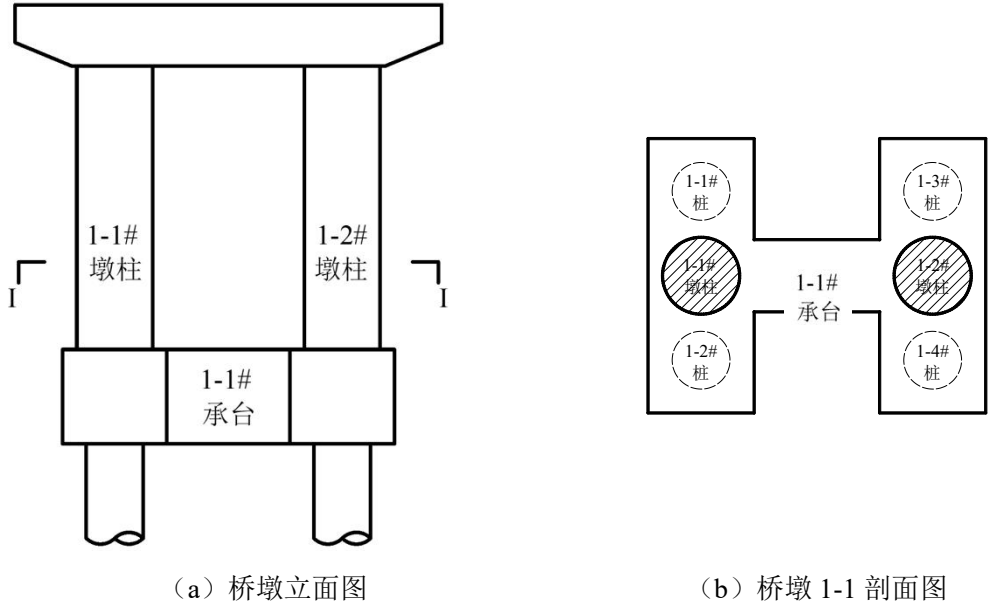


图 B.2 水下结构编号示意图

附录 C

(资料性)

水下墩桩构件检测推荐路径

墩桩构件的测扫规划路径,可根据构件的长径比,采用环绕扫测法或垂直扫测法对检测对象进行全历遍扫测。环绕扫测法是指顺时针、逆时针交替环绕进行扫测,先顺时针环绕检测,环绕一周后,控制 ROV 机身下潜至下一水平检测面,再以逆时针方向环绕拍摄,依次下潜直至整个构件拍摄完毕,该检测方法可避免线缆缠绕构件影响作业,适合长径比较大的细长构件,如图 C.1a 所示。垂直扫测法是指从上往下沿构件进行扫测,直至构件下部,控制 ROV 机身水平方向调整至下一垂直检测面,再从下往上沿构件扫测,如图 C.1b 所示。检测的精度要求,详见表 D.1。

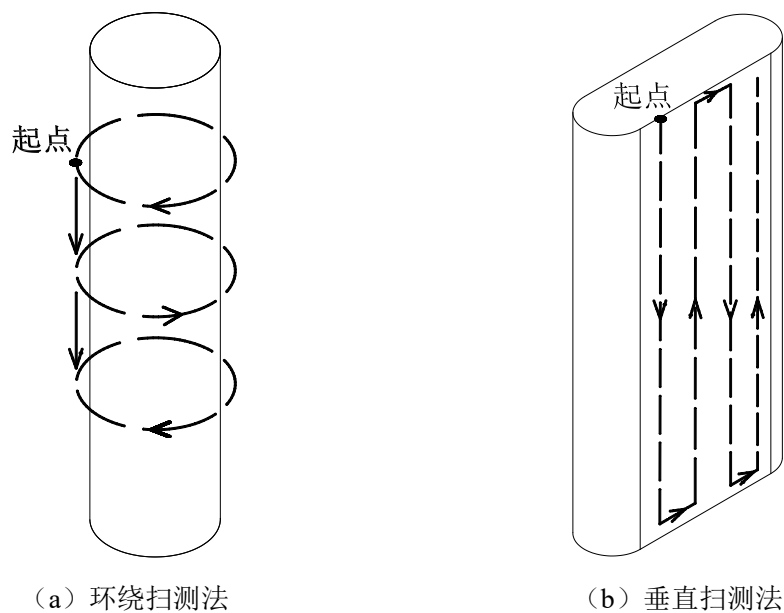


图 C.1 ROV 检测轨迹示意图

附录 D
(规范性)
数据处理

D.1 缺陷所在高程的确定方法

根据 7.3.3 和 7.3.7 所测定的水面与上部结构梁体底部的距离 H 、河床所在的水深 D 、缺陷所在水深 d ，计算缺陷位置与河床底部的距离 $Z1$ ，以及与上部结构梁体的距离 $Z2$ ，如图 D.1。

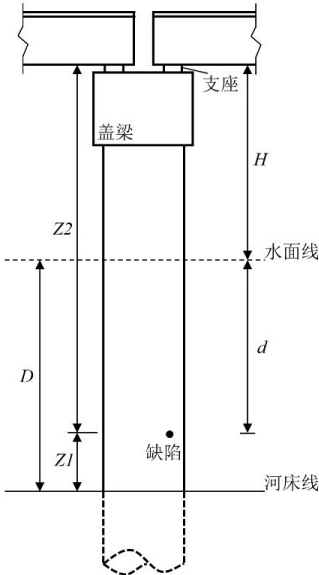


图 D.1 基桩缺陷方向确定方法

D.2 圆柱形构件缺陷朝向的确定方法

以极坐标法，通过缺陷朝向角 θ 表示圆柱形构件在某一深度 d 的缺陷所在位置。缺陷朝向角 θ 为缺陷部位中心点所在深度构件横截面圆心连线与南北方向连线之间的夹角，如图 D.2。

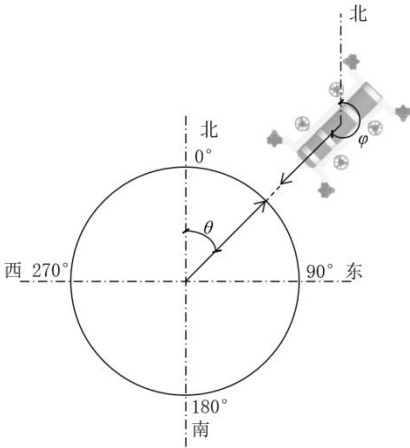


图 D.2 基桩缺陷方向确定方法

夹角 θ 可以通过对 7.3.7 所测定的 ROV 水平方向角 φ 换算而得出，计算方法如公式(1)。

$$\begin{cases} \theta = \varphi + 180, & \varphi < 180 \\ \theta = \varphi - 180, & \varphi \geq 180 \end{cases} \quad (1)$$

- D.3 非圆柱体构件缺陷的水平位置，宜采用声呐的构件轮廓极坐标图进行确定。
- D.4 应采用图像识别软件对水下结构缺陷的尺寸进行计算，精度宜满足表 D.1 的要求。

表 D.1 外观缺陷计算精度表

序号	水下结构缺陷类型		精度要求
1	混凝土构件	保护层剥落	1cm ²
2		破损（掉角）	1cm ²
3		露筋	1cm
4		空洞	1cm ²
5		孔洞	1cm ²
6		麻面	1cm ²
7		冲蚀	1cm ²
8		钢筋锈蚀	1cm
9		裂缝	长度：1cm 宽度：0.20mm
10	水下圬工构件	砌体破损	1cm ²
11		剥落	1cm ²
12		松动	1cm ²
13		变形	1cm ²
14		裂缝	长度：1cm 宽度：0.20mm
15		灰缝脱落	1cm ²
16	水下钢构件	涂层脱落	1cm ²
17		严重锈蚀	1cm ²
18		焊缝开裂	1mm

- D.5 对回弹值的修正，可以采用公式(2)：

$$R_s = R_c e^{-0.1002v} \quad \#(2)$$

式中：

R_s ——修正后的回弹值；

R_c ——待修正的回弹实测值；

v ——构件所在流域流速（m/s）。

- D.6 对超声值的修正，可以采用公式(3)：

$$V_s = V_c e^{-0.0091h} \quad \#(3)$$

式中：

V_s ——修正后的超声声速值（km/s）；

V_c ——待修正的超声声速实测值（km/s）；

h ——结构所处水深（m）。

- D.7 基于回弹法的测区混凝土强度换算值，可按以下步骤进行计算：

- 计算测区平均回弹值，应从测区的 20 个修正后的回弹值中，剔除最大的 5 个和最小的 5 个，以其余 10 个回弹值的平均值为该测区的平均回弹值 R_s ；
- 将测区平均回弹值 R_s 代入公式(4)，计算该测区的强度换算值。

$$F_{cu,i}^c = 0.276 R_s^{1.4983} \quad \#(4)$$

式中：

$F_{cu,i}^c$ ——测区混凝土强度换算值（MPa）；

R_s ——修正后的回弹值。

D.8 基于超声法的测区混凝土强度换算值计算，应计算测区 3 个声速值的平均值 V_s ，再将声速平均值 V_s 代入公式(5)，计算该测区的强度换算值。

$$F_{cu,i}^c = 1.581V_s^{2.143} \quad \#(5)$$

式中：

$F_{cu,i}^c$ ——测区混凝土强度换算值 (MPa)；

V_s ——待修正的超声声速实测值 (km/s)。

D.9 基于超声回弹综合法的测区混凝土强度换算值计算，应将 D.5 和 D.6 中计算得到的 R_s 和 V_s 代入公式(6)，计算该测区的强度换算值。

$$F_{cu,i}^c = 0.0187R_s^{1.09}V_s^{2.646} \quad \#(6)$$

式中：

$F_{cu,i}^c$ ——测区混凝土强度换算值 (MPa)；

R_s ——修正后的回弹值；

V_s ——待修正的超声声速实测值 (km/s)。

D.10 构件的混凝土强度推定值应该根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ-T23-2011 和《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》T/CECS 02-2020 的相关规定，将 D.7、D.8 和 D.9 中计算得到的测区强度换算值代入相关公式进行计算。

D.11 构件内部缺陷，应根据《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS21:2000，将波幅、主频或按 D.6 修正后的声速值代入相关公式进行计算和分析判断。

a) 将测位各测点的波幅、主频或声速值由大至小按顺序分别排列，如式(7)：

$$X_1 \geq X_2 \geq \dots \geq X_n \geq X_{n+1} \geq \dots \quad (7)$$

b) 将排在后面明显小的数据视为可疑，再将这些可疑数据中最大的一个(假定 X_n)连同其前面的数据按式(8)和(9)计算出平均值(m_s)及样本标准差(s_x)：

$$m_x = \sum \frac{X_i}{n} \quad (8)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{(\sum X_i^2 - n \cdot m_x^2)}{(n-1)}} \quad (9)$$

式中： X_i 为第 i 点的声学参数测量值； n 为参与统计的测点数。

c) 按公式(10)计算异常情况的判断值(X_0)：

$$X_0 = m_x - \lambda_1 \cdot s_x \quad (10)$$

式中 λ_1 按表 D.2 取值。

d) 将判断值(X_0)与可疑数据的最大值(X_n)相比较，当 X_n 不大于 X_0 时，则 X_n 及排列于其后的各数据均为异常值，进行步骤 e)；当 X_n 大于 X_0 时，进行步骤 f)；

e) 去掉 X_n ，再用 $X_1 \sim X_{n-1}$ 重新进行计算和判别，直至判不出异常值为止；

f) 增加 X_{n+1} ，再用 $X_1 \sim X_{n+1}$ 重新进行计算和判别，直至判不出异常值为止；

g) 当测位中判出异常测点时，可根据异常测点的分布情况，按下式(11)进一步判别其相邻测点是否异常：

$$X_0 = m_s - \lambda_2 \cdot s_x \text{ 或 } X_0 = m_s - \lambda_3 \cdot s_x \quad (11)$$

式中 λ_2 、 λ_3 按表 D.2 取值。当测点布置为网格状时取 λ_2 ；当单排布置测点时取 λ_3 。

表 D.2 统计个数的个数 n 与对应的 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 值

n	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ_1	1.65	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.92	1.94
λ_2	1.25	1.27	1.29	1.31	1.33	1.34	1.36	1.37	1.38	1.39
λ_3	1.05	1.07	1.09	1.11	1.12	1.14	1.16	1.17	1.18	1.19
n	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ_1	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.12
λ_2	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.49
λ_3	1.20	1.22	1.23	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29	1.30	1.31
n	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ_1	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
λ_2	1.50	1.51	1.52	1.53	1.53	1.54	1.55	1.56	1.56	1.57
λ_3	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	1.36	1.37	1.38	1.39
n	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ_1	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.30	2.30	2.31	2.31
λ_2	1.58	1.58	1.59	1.60	1.61	1.61	1.62	1.62	1.63	1.63
λ_3	1.39	1.40	1.41	1.42	1.42	1.43	1.44	1.45	1.45	1.45
n	100	105	110	115	120	125	130	140	150	160
λ_1	2.32	2.35	2.36	2.38	2.40	2.41	2.43	2.45	2.48	2.50
λ_2	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69	1.71	1.73	1.75	1.77
λ_3	1.46	1.47	1.48	1.49	1.51	1.53	1.54	1.56	1.58	1.59

- h) 当测位中某些测点的声学参数被判为异常值时，可结合异常测点的分布状况确定混凝土内部存在不密实区和空洞的位置及范围。

参 考 文 献

- [1] TG/GW275-2015 铁路桥梁检定评估管理办法
- [2] T/CECS G: J56 公路桥梁水下构件检测技术规程
- [3] T/CCTAS 67 桥梁水下结构声呐法检测技术规程
- [4] T/CECS 1114 工程结构数字图像法检测技术规程
- [5] T/CECS 02-2020 超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程