

ICS 27.140

CCS P 59



中华人民共和国水利行业标准

SL/T 436—2023

替代 SL 436—2008

堤防隐患探测规程

Code for hidden danger detection of dike

2023-03-27 发布

2023-06-27 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部
关于批准发布《堤防隐患探测规程》等 2 项
水利行业标准的公告

2023 年第 8 号

中华人民共和国水利部批准《堤防隐患探测规程》(SL/T 436—2023) 等 2 项为水利行业标准, 现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	堤防隐患探测 规程	SL/T 436—2023	SL 436—2008	2023.3.27	2023.6.27
2	堤防工程养护 修理规程	SL/T 595—2023	SL 595—2013	2023.3.27	2023.6.27

水利部

2023 年 3 月 27 日

前　　言

根据水利部水利技术标准制修订计划安排，按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的要求，对 SL 436—2008《堤防隐患探测规程》进行修订。

本标准共 13 章和 2 个附录，主要技术内容有：

- 电法，包括自然电场法、直流电阻率法和激发极化法；
- 电磁法，包括瞬变电磁法、磁电阻率法；
- 探地雷达法；
- 拟流场法；
- 弹性波法，包括反射波法、折射波法和瑞雷波法；
- 水下探测方法，包括水下结构探测方法和水下浅地层探测方法；
- 温度场法；
- 同位素示踪法；
- 钻孔全景光学成像法；
- 锥探法。

本次修订的主要内容有：

- 第 3 章基本规定中增加了防汛抢险时隐患探测工作的要求；
- 第 4 章电法中增加了二维和三维电阻率成像方法，激发极化法；
- 第 5 章电磁法中增加了磁电阻率法；
- 第 6 章探地雷达法中增加了孔内探测和三维探测方法；
- 新增第 9 章水下探测方法、第 12 章钻孔全景光学成像法和第 13 章锥探法；
- 调整了第 10 章温度场法和第 11 章同位素示踪法部分内容。

本标准所替代标准的历次版本为：

—SL 436—2008

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部运行管理司

本标准解释单位：水利部运行管理司

本标准主编单位：黄河水利委员会黄河水利科学研究院

本标准参编单位：中国水利水电科学研究院

郑州大学

中水北方勘测设计研究有限责任公司

河海大学

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

黄河勘测规划设计研究院有限公司

中南大学

上海遨拓深水装备技术开发有限公司

湖南继善高科技有限公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：冷元宝 王 锐 姚成林 王运生

刘康和 曹 伟 陈 红 肖长安

姜文龙 李长征 周 杨 张清明

李姝昱 李延卓 杨 磊 李帝铨

沈 勤

本标准审查会议技术负责人：崔德密

本标准体例格式审查人：郑 寓

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条2号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	4
3.1 探测对象、方法及要求	4
3.2 外业工作	5
3.3 资料解释与验证	6
3.4 成果报告	7
4 电法	8
4.1 自然电场法	8
4.2 直流电阻率法	9
4.3 激发极化法	12
5 电磁法	14
5.1 瞬变电磁法	14
5.2 磁电阻率法	16
6 探地雷达法	19
7 拟流场法	25
8 弹性波法	27
8.1 反射波法	27
8.2 折射波法	30
8.3 瑞雷波法	33
9 水下探测方法	36
9.1 水下结构探测方法	36
9.2 水下浅地层探测方法	41
10 温度场法	43
11 同位素示踪法	44
12 钻孔全景光学成像法	46

13 锥探法	48
附录 A 常用物性参数	50
附录 B 常用公式	55
标准用词说明	59
标准历次版本编写者信息	60
条文说明	61

1 总 则

1.0.1 为规范堤防隐患探测技术要求，保证探测成果质量和探测精度，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于堤防的隐患探测工作。

1.0.3 本标准的主要引用标准有：

GB/T 12763.8 海洋调查规范 第8部分：海洋地质地球物理调查

GB 50027 供水水文地质勘察规范

SL/T 291.1 水利水电工程勘探规程 第1部分：物探

SL 734 水利工程质量检测技术规程

HY/T 253 浅地层剖面调查技术要求

JT/T 790 多波束测深系统测量技术要求

JT/T 1362 侧扫声呐测量技术要求

1.0.4 探测方法与设备选择应符合技术先进、安全可靠、经济合理的原则；宜通过在探测区域开展现场试验确定探测方法。

1.0.5 对新方法、新装置、新设备，经现场试验确认探测效果后，应优先采用。

1.0.6 探测工作相关单位应将探测成果作为重要的工程基础信息进行整理、保存；宜通过数字化、网络化、智能化技术手段提高探测成果解释、分析、展示和应用水平；宜将探测成果纳入各级数字孪生系统和工程信息化平台，实现多源信息的联动和综合运用。

1.0.7 探测工作应进行项目危险源识别，明确现场安全、职业健康和环境保护措施；探测过程中，应保证检测人员和设备安全。

1.0.8 堤防隐患探测工作除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 堤防隐患 dike hidden danger

影响或潜在影响堤防安全的堤身、堤基内部质量缺陷，薄弱部位，水下结构缺陷及其他不利因素。

2.0.2 电阻率成像法 resistivity imaging method

利用电极阵列，自动完成多种电极排列测量，通过数据反演等方法对探测部位进行成像，判断隐患位置和性质的一种探测方法，包括二维电阻率成像和三维电阻率成像。

2.0.3 磁电阻率法 magnetometric resistivity method (MMR)

通过在堤防迎水侧和背水侧供交变电流，测量探测区域内的磁场，分析地下电流空间分布规律，判断集中渗漏通道的一种探测方法。

2.0.4 拟流场法 flow field simulation method

利用编码电源建立特殊的电流场，拟合渗漏造成的异常水流场分布，通过检测电流场强度，判断渗漏和管涌进口位置的探测方法。

2.0.5 一般水下探测 normal underwater detection

利用水下摄像、水下声呐等设备，在探测区域开展普查性质的快速探测。

2.0.6 温度场法 temperature field method

利用温度测量设备探测堤身区域内温度场分布，判断堤防渗漏部位的方法。

2.0.7 同位素示踪法 isotope tracer technique

利用放射性同位素标记天然流场或人工流场中的地下水，通过测量同位素运动、分布特征，探测渗漏、管涌的放射性测量方法。

2.0.8 钻孔全景光学成像法 panoramic digital imaging of borehole

利用视频数字化全景技术，采集钻孔孔壁环向全景图片，形

成孔壁数字化图像的一种方法。

2.0.9 锥探法 cone drilling method

以人工或机械方式，利用探杆探测堤身隐患和堤岸防护工程根石分布的方法。

3 基本规定

3.1 探测对象、方法及要求

3.1.1 探测对象应根据工作任务确定，包括堤身与堤基的洞穴、裂缝、松散体、薄弱层、渗漏以及故河道、护坡脱空区、水下结构缺陷及其他水下异常体、堤岸防护工程水下基础缺陷等。

3.1.2 探测方法应根据各方法的适用范围、应用条件和探测对象特点选用；有多种适用方法时，宜通过对比试验选择精度满足要求、效率较高的方法；工程条件复杂，单一方法判断隐患位置、性质存在困难的，宜选用2种或2种以上不同原理的方法开展综合探测。

3.1.3 探测工作可分为普查和详查；普查宜以保证工作效率为优先目标选择探测方法和测线、测点布置方案；详查宜在普查工作的基础上，加密测线、测点探测，或在同一测区开展多方法综合探测。

3.1.4 仪器设备应经检定或校准并确认符合要求，在有效期内。

3.1.5 原始记录应包括现场记录、观测数据等；原始记录应包括纸质和电子记录，电子记录应设为不可修改格式；各阶段成果宜进行信息化管理，并应及时备份。

3.1.6 防汛抢险时的应急探测应符合下列规定：

1 探测对象宜包括渗漏通道位置、渗漏进口位置、堤后散浸部位等。

2 探测方法应根据现场工作条件，选择工作效率高、成果直观、定位准确的方法。渗漏通道位置探测宜选择高密度电阻率法、探地雷达法等；渗漏进口位置探测宜选择自然电位法、拟流场法等；堤后散浸部位探测宜选择温度场法。

3 内、外业工作可根据现场条件进行适当调整，简化工作步骤，提高探测效率。

4 应急探测的成果报告应简明扼要，突出重点；探测成果应明确隐患的关键信息，如渗漏通道深度、走向，渗漏进口坐标或分布范围，散浸的区域等。

3.2 外业工作

3.2.1 外业工作前应调查收集被探测堤段设计、施工资料，历次洪水期间堤防运行和出险情况，以及工程养护和除险加固资料等。

3.2.2 测区、测线、测点布置方案应根据探测目的、探测方法、工程结构和探测区域规模确定；测线、测点布置应根据堤防宽度、走向合理规划，可选择堤顶中线、堤坡、堤脚等部位。

3.2.3 探测堤段宜按照 SL 734 的要求划分检测单元。

3.2.4 外业工作中可根据追踪隐患的需要，调整测线、测点布置。

3.2.5 测区、测线、测点位置应利用测量设备定位；其定位应以管理桩号为准，无管理桩号的，可设置工作桩号。

3.2.6 探测时应填写现场记录，内容应包括堤防外观，探测日期，探测环境、天气、人员、仪器等情况。

3.2.7 每班探测前应检查仪器，并做相应记录。

3.2.8 分班、分段探测时，不同班次、段次的探测范围应重合衔接，重合范围应根据不同探测方法的特点确定。

3.2.9 测线端点、曲线突变点和畸变线段、仪器参数或观测条件改变时，应进行重复观测；重复观测平均相对误差应小于 5%。

3.2.10 探测过程中，发现异常点后应分析原因并进行重复观测，并记入现场记录。

3.2.11 探测过程中应进行检查观测，检查观测应符合下列规定：

1 测线检查观测工作量不应少于测区或测线总工作量的 5%。

2 检查点宜在全测区内均匀分布，异常地段、可疑点、突变点应有检查点。

3 检查观测误差大于要求时，该测区或测线的数据应全部重测。

3.2.12 探测资料宜在当日完成初步整理，仪器内数据资料应及时备份至其他存储介质；应检查不同测段之间是否有遗漏段，资料是否齐全；对可疑资料应核查或重测。

3.3 资料解释与验证

3.3.1 资料解释、验证与出具探测成果宜采用下列步骤：

- 1 整理资料。
- 2 绘制中间图件。
- 3 分析探测资料，确定解释原则。
- 4 确定隐患的性质、位置及规模。
- 5 提出验证意见，组织验证。
- 6 根据验证结果修正解释。
- 7 堤身质量分类。
- 8 成果图绘制与打印。
- 9 报告编写。

3.3.2 分析探测资料、确定解释原则时，应结合堤防的历史沿革、除险加固、洪水位、出险情况和现场记录等资料；资料解释和验证工作应结合相关地质勘察资料开展，物性参数可参照附录 A，计算公式可参照附录 B；异常的解释宜参考标准隐患图谱、工程条件类似地区的探测成果等相关资料。

3.3.3 隐患性质、位置及规模可根据异常的位置、幅度和其他特征判断。

3.3.4 对物探方法发现的隐患，宜进行抽样验证；验证方法可选择钻探、坑探、触探、测井等。

3.3.5 需对探测数据进行反演处理时，宜选择标准模型数据验证反演软件效果。

3.3.6 堤防分类宜根据资料解释和验证成果进行；类型可包括未发现隐患段、隐患相对发育段和隐患发育段。

3.4 成果报告

3.4.1 探测成果报告宜包括下列内容：

1 工作概况，宜包括堤防概况、探测任务、工作组织与实施情况等。

2 方法技术，宜包括方法选择、方法原理、仪器设备。

3 工作布置，宜包括测区、测线、测点的布置情况。

4 外业工作，宜包括外业工作安排、实施情况、质量控制等。

5 资料分析与解释验证，宜包括原始资料评价、资料处理与解释方法、异常定性和定量分析、隐患推断解释、验证情况等。

6 结论与建议，宜包括探测成果分析、隐患处理建议等。

3.4.2 探测成果报告应附图表；附图可包括测线布置图、探测成果图等；附表可包括工作量统计表、仪器参数表、成果统计表等。

3.4.3 探测成果应经校核和审查后提交；成果报告提交后应及时归档，归档资料应包括纸质文件和相应的电子文档，宜包括任务书或项目合同、工作方案、现场记录、中间成果资料、成果报告及图件。

4 电 法

4.1 自然电场法

4.1.1 自然电场法可用于探测堤防的集中渗流、管涌通道，确定渗漏进口位置及流向等。

4.1.2 采用自然电场法应符合下列条件：

1 渗流场有较大的压力差，在渗透过滤、扩散吸咐等作用下形成较强自然电场。

2 测区内无较强的工业杂散电流、大地电流或电磁干扰。

4.1.3 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 输入阻抗应大于 $8M\Omega$ 。

2 电压测量允许误差应为 $\pm 1\%$ ，分辨力不应大于 $0.01mV$ 。

3 测量应使用不极化电极。

4.1.4 外业工作应符合下列规定：

1 观测方式宜采用电位观测法，也可采用梯度法；探测渗流方向时，宜增加环形观测方式。

2 测线宜沿堤防轴线方向布设；快速探测渗漏管涌进水位置时，宜距岸边 $0.5m$ 在水面设 1 条测线；追踪渗漏管涌进口位置时，宜增设数条平行于堤岸的水面测线；探测渗漏、管涌通道时，除设前述水面测线外，宜在临水和背水坡面、堤肩、堤脚、地面等处增设平行于堤防的测线。

3 探测时宜先采用 $5\sim 10m$ 的点距进行普查；发现异常后，宜在异常位置附近采用小于 $0.5m$ 的点距加密探测。

4 各测区探测工作开始前和结束后应测量不极化电极的极差；工作开始时，极差绝对值应小于 $2mV$ ，工作结束时，极差绝对值应小于 $5mV$ ；观测过程中应保证电极接地良好。

5 测线较长或杂散电流影响较大时应分段探测，分段衔接处应重复 3 个以上测点。

6 每 10 个测点应进行 1 次重复观测。

4.1.5 数据处理应符合下列规定：

1 应计算单个测点的绝对误差和各测线/测区的平均绝对误差；单个测点的绝对误差应小于 3mV，测线/测区的电位法测值平均绝对误差应小于 5mV，梯度法测值平均绝对误差应小于 3mV。

2 应根据工程、环境条件分段确定背景值，剔除干扰异常。

3 应将各测点的电位换算到相应的分基点和总基点上，计算各测点的数据，编制各测点的绘图数据文件。

4.1.6 资料解释应符合下列规定：

1 相邻 3 个及以上测点的数据与背景值之差超过测量平均绝对误差的 3 倍时，可确定为有效异常。

2 隐患范围应根据剖面图或平面等值线图确定，隐患规模、埋深可根据异常分布、幅值等特点估算。

3 成果图表应包括自然电位曲线图、自然电位梯度图、隐患分布图。

4.2 直流电阻率法

4.2.1 直流电阻率法可选用电剖面法、电测深法、高密度电阻率法及跨孔、三维、时移等电阻率成像方法。

4.2.2 直流电阻率法可用于洞穴、裂缝、松散体、砂层及渗漏区域等隐患的探测；跨孔电阻率成像、三维电阻率成像可用于土石接合部隐患探测；时移电阻率成像可用于堤防的连续监测。

4.2.3 采用直流电阻率法应符合下列应用条件：

1 隐患和周边介质之间应存在明显的电性差异，并在仪器设备和装置的探测范围内。

2 测区内具有良好的接地条件，目标体上方无高电阻屏蔽层。

3 测区内不应存在较强的工业杂散电流、大地电流或电磁干扰。

- 4.2.4** 仪器设备性能和指标应符合下列规定：
- 1** 输入阻抗应大于 $8M\Omega$ 。
 - 2** 电压测量允许误差应为±1%，分辨力不应大于0.01mV。
 - 3** 电流测量允许误差应为±1%，分辨力不应大于0.01mA。
 - 4** 最大供电电压不应小于500V。
 - 5** 最大供电电流不应小于2A。
 - 6** 对50Hz工频干扰抑制不应小于40dB。
 - 7** 仪器、供电导线与大地之间应绝缘，仪器外壳与电极间绝缘电阻应大于 $100M\Omega$ ；高密度电法电缆芯线电阻不应大于 $240\Omega/km$ ，芯间绝缘电阻不应小于 $5M\Omega/km$ 。
- 4.2.5** 外业工作应符合下列规定：
- 1** 探测装置可选择四极、偶极、三极等装置。
 - 2** 应根据探测任务要求、探测目标深度合理选择电极距和测点距；采用跨孔、地面一孔间或三维电阻率成像测试时，应根据探测区域合理设计观测系统。
 - 3** 高密度电阻率法宜按最大电极距的1/6估计最大探测深度。
 - 4** 电测深法、电剖面法、高密度电阻率法探测时，电极应沿直线布置；弯曲堤段应分段探测。
 - 5** 电极的接地电阻应满足仪器要求，不宜大于 $10k\Omega$ ；个别电极接地不良时，可通过堆土、挖坑填土等方式改善接地条件。
 - 6** 遇障碍物时，电极应优先垂直于测线方向移动，移动距离不宜大于电极距的5%；当只能沿测线方向挪动时，挪动距离不应大于电极距的2%；无法按要求避开障碍时，应分段探测，分段间可不进行重复探测。
 - 7** 每次测试开始和结束时，应进行漏电检查；探测时发现漏电后应停止观测，并查明原因，在消除漏电影响后，对可能受到影响的测点应重新观测。
 - 8** 重复观测应符合下列规定：
 - 1)** 发现异常，应检查极距、接线和漏电情况，查看堤防

环境，排除干扰因素并进行重复观测，有关情况应记录。

- 2) 中间梯度法在移动供电电极后，应重复 3 个测点。
- 3) 重复观测时，宜改变供电电压或改善电极接地条件。
- 4) 重复观测不应少于 3 次。重复观测的精度用视电阻率 ρ_v 值或测试电流与电压的比值的相对误差 δ 衡量， δ 不应大于 3%。

9 检查观测应符合下列规定：

- 1) 每 2km 测线应进行不少于 1 次检查观测。
- 2) 系统检查观测精度用均方相对误差衡量，均方相对误差不应大于 3.5%。

4.2.6 数据处理应符合下列规定：

1 数据处理前应进行资料整理，内容包括整理现场记录、检查数据的正确性及完整性等。

2 数据格式整理、坏值剔除及格式转换、拼接等预处理应根据测试记录和仪器记录信息操作；对地形起伏较大区域的探测数据，应利用实测地形数据进行地形校正。

3 应利用专业软件进行数据处理、反演和成果图件绘制；剖面成像宜采用反演、目标相关算法等方法。

4 成果图件制作应符合下列规定：

- 1) 曲线宜居于图幅中间。
 - 2) 同一测区宜统一图件比例、等值线间隔和色标设置。
 - 3) 图件应突出异常。
- 5 绘制视电阻率剖面图可采用圆滑技术，并在报告中说明。

4.2.7 资料解释应符合下列规定：

1 解释原则确定和探测资料分析应符合下列规定：

- 1) 背景值宜根据视电阻率曲线平稳程度，采用数理统计方法选取。
- 2) 可靠异常幅度，未圆滑的曲线，宜取背景值的 30%；圆滑过的曲线，宜取背景值的 20%；背景值平稳的堤

段，可降低 5%~10%。

- 3) 划分土质不良堤段，应以视电阻率背景值为准，参考地质资料确定；若堤身中有较大范围的不均匀体时，应视为土质不良区域。
- 4) 资料对比解释宜结合已知地质剖面、钻孔等资料及其他探测方法成果。

2 成果图件可为视电阻率剖面曲线图、测深曲线图、二维电阻率等值线图、电阻率色谱图、相关系数成像图、三维电阻率分布图、切片图等；解释成果宜包括隐患分布图、隐患探测成果表、堤身质量分类表等。

4.3 激发极化法

4.3.1 激发极化法可用于渗漏区域探测。

4.3.2 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 应具有显示视极化率、视激发比、半衰时、衰减度等综合激电参数、电极参数等功能。

2 应具有自然电位、漂移及电极极化补偿功能。

3 供电电极应采用铜电极或不锈钢电极，测量电极应采用不极化电极。

4 不极化电极极差不应大于 2mV，且相对稳定。

4.3.3 外业工作应符合下列规定：

1 探测装置宜选择对称四极装置；进行长剖面探测时，可用中间梯度装置。

2 对称四极装置的最大供电电极距 AB 应大于探测深度的 3 倍。

3 供电导线与测量导线之间的距离应大于 1m，且应随导线长度增加而增大。

4 观测供电时间宜大于 30s。

5 出现二次场电位差 ΔU_2 小于 1mV、视激发比值 J_2 大于或接近视极化率值 η_2 、视衰减值 D_2 大于或接近 100% 时应重复

观测。

4.3.4 数据处理应符合下列规定：

1 应计算、绘制每个测点的 ρ_s 、 η_s 、 J_s 、 D_s 、 $S_{0.5}$ 值和曲线。

2 应根据地质、环境条件分段确定背景值，也可将已知地下水位以上或干孔旁测得的 ρ_s 、 η_s 、 J_s 、 D_s 、 $S_{0.5}$ 数据作为背景值，剔除干扰异常。

3 相邻 3 个及以上测点的数据与背景值之差超过测量平均绝对误差的 3 倍，可确定为异常，并应有一定的规律性和分布范围。

4.3.5 资料解释应符合下列规定：

1 资料解释应结合电阻率和多种激电参数综合分析。

2 可结合其他方法的验证资料确定异常极化体形状、大小、埋深。

5 电 磁 法

5.1 瞬变电磁法

5.1.1 瞬变电磁法可用于探测渗漏通道、松散体、砂层等隐患；探测大范围松散体、砂层等隐患宜选用重叠回线装置；探测渗漏通道和小范围松散体、砂层等隐患，宜选用中心回线及定源回线装置。

5.1.2 采用瞬变电磁法探测堤防隐患应符合下列条件：

- 1 堤防表面平坦，便于布设探测线圈。
- 2 堤防隐患与周边介质有明显的电阻率差异，并在装置探测深度内。

3 测线应避开金属物体、高压电力线、路面积水以及其他易引起电磁噪声干扰的物体。

5.1.3 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

- 1 发射电流关断时间应小于接收信号采样延时。
- 2 当使用单匝、边长 1~10m 回线框时，发射电流关断时间应小于 $2\mu\text{s}$ 。
- 3 接收机分辨率优于 $2\mu\text{V}$ 。
- 4 接收机动态范围应大于 120dB。
- 5 对于多道接收机，各道幅频特性和相频特性均应一致，相对偏差不应大于 5%。

5.1.4 外业工作应符合下列规定：

- 1 探测装置可采用中心回线、重叠回线、偶极、定源回线等装置。
- 2 测线宜顺堤防桩号在堤顶布设，测点距可根据探测任务调整；发现异常时可进行加密探测，中心回线加密探测时，每次移动的距离可为发射回线边长的 $1/2$ ；探测渗漏通道时，宜在前后坡面、堤肩、堤脚、地面等处增设平行于堤防的测线。

3 测区内有其他方法的测线、测点或钻孔等验证点时，测线宜与其重合或接近。

4 回线边长、匝数及供电电流应根据探测要求选择，应保证发射磁矩满足探测要求；探测发射框规格宜为 $1m \times 1m$ 、 $2m \times 2m$ 、 $4m \times 6m$ 。

5 宜采用电阻小、绝缘性能好的导线，导线电阻应小于 $6\Omega/km$ 。

6 线框铺设完毕，若线架上还有导线，应将剩余导线按 S 形铺设。

7 扩散深度宜按附录 B 中 B.0.10 条的公式计算，探测深度可按扩散深度的半值估计。

8 电磁噪声电平应在每个测点或相隔几个测点上测定。

9 采用大尺寸回线或多匝回线时，应评估发射波形斜波关断时间，宜与接收信号延时采样匹配，可参照附录 B 式 (B.0.10-4) 估算。

10 叠加次数应根据数据信噪比及探测速度确定。

11 时间窗口应通过现场试验确定，并应采用多通道观测 U/I 或 B/I 。

12 每个测点观测完毕，应对数据和曲线进行检查，符合测试要求后方可移动测点。

13 重复观测应符合下列规定：

- 1)** 除最后 3~5 道外，观测值在噪声电平以下时，应查明原因，并采用增加叠加次数等方法重复观测。
- 2)** 测点曲线出现畸变时，应查明原因后重复观测；若测点附近存在干扰源，可移动点位避开重测，并做记录。
- 3)** 在异常附近应加密测点，若曲线衰减变慢时，应扩大时间范围重复观测。
- 4)** 单个测点的观测、重复观测和检查观测曲线的形态和幅值应一致，且各观测道的总均方相对误差 m 应小于 10%。

5) 一条测线或测网检查的总均方相对误差 m 应小于 15%。

5.1.5 数据处理应符合下列规定：

- 1 宜对早期电磁响应进行地形校正。
- 2 可对成果数据进行滤波处理。
- 3 视电阻率—深度、视时间常数—深度、电压幅值比值、视纵向电导—深度断面图应通过专业软件处理和绘制。

5.1.6 资料解释应符合下列规定：

- 1 资料解释时，应根据瞬变电磁的响应时间特征和剖面曲线类型划分背景场及异常场，确定地电模型、划分异常。
- 2 应结合测点临近区域的钻探、物探、地质等有关资料进行综合解释分析，宜通过已知资料建立异常性质、深度、范围的对应关系，并据此对同测区其他视电阻率剖面进行解释。
- 3 解释应与资料处理工作交互进行，应结合垂直断面剖面与水平切面资料进行解释。
- 4 成果图件应包括视电阻率剖面图、解释成果剖面或平面图。

5.2 磁电阻率法

5.2.1 磁电阻率法可用于渗漏通道探测。

5.2.2 采用磁电阻率法探测堤防隐患应符合下列条件：

- 1 渗漏通道与周围介质存在明显的电性差异。
- 2 测区内无金属物体等易引起干扰的物体。

5.2.3 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

- 1 应采用三分量磁探头。
- 2 接收机最大量程宜大于 1mT 。
- 3 接收机分辨率宜小于 10pT 。
- 4 接收机带宽不宜窄于 3kHz 。

5.2.4 外业工作应符合下列规定：

- 1 测线或测网应覆盖目标探测区域，应根据工作任务、现

场条件等布置。

2 测线宜平行堤防轴线布置。

3 测线、测点间距应根据探测水平定位精度要求确定，线距宜为5~20m，点距宜为5~20m。

4 应根据外业工作条件选择水平布置装置和垂直布置装置，堤防隐患探测宜选用水平布置装置。

5 供电电缆宜远离测区边缘，距离宜大于测区边长。

6 供电电流宜采用直流电或低频交流电，并避免采用电网工频。

7 供电电流不宜小于0.5A。

8 数据采集前，应设置基站并监测磁场变化。

9 雷雨天气不宜进行野外作业，突遇雷电应关机，断开仪器接线。

10 每次测试应记录测区内金属管道、金属栏杆、电缆等物体的分布情况。

11 重复观测和检查观测应符合下列规定：

1) 出现异常、曲线畸变的测点应重复观测。

2) 重复观测点均方相对误差大于10%时，应查明原因，消除误差；必要时，可移动点位重测，并记录。

3) 每个测区的检查点不应少于测点总数的5%。

4) 检查测点应在测区均匀分布，异常地段、可疑点、突变点应设检查测点。

5) 单个测点的观测、重复观测或检查观测曲线形态应一致。

6) 测线或测区检查的总均方相对误差不应大于10%。

5.2.5 数据处理应符合下列规定：

1 应整理测区全部测点或测线的曲线记录。

2 应剔除不符合质量要求的数据；应对数据进行系统分析和评价，确定合理的滤波、圆滑、校正等预处理方法。

3 应对比分析处理前后各测点和测线的数据，必要时可调

整方法和参数重新处理。

5.2.6 资料解释应符合下列规定：

- 1 定性解释应结合地质资料、现场记录及已有物探成果。**
- 2 可在定性解释的基础上进行反演与定量解释；定量解释时，应结合已有资料和电性参数，确定背景值和目标体的划分标准，确定隐患的空间分布。**
- 3 数据反演计算过程中应选择不同的反演方法和参数，对比分析不同反演方法的结果，并与已知资料对比，确定合理的反演结果。**
- 4 成果图件应包括电阻率分布图、定性解释成果图；反演和定量解释成果还应包括反演成果图，定量解释成果图。**

6 探地雷达法

6.0.1 探地雷达法可用于堤防隐患普查和详查，探测洞穴、松散体、砂层、裂缝、软夹层、故河道、老口门、渗漏通道、护坡、衬砌或闸室底板脱空等与周边介质存在明显介电常数差异的目标体。

6.0.2 探测方式应根据探测目的、隐患性状和环境条件选择，可选用剖面法、透射法、宽角法、共中心点法、孔内探测法和三维探测法。

6.0.3 采用探地雷达法探测堤防隐患应符合下列条件：

1 隐患与周边介质的介电常数存在明显差异，电性相对稳定，电磁波反射信号明显。

2 相对于天线尺寸，探测表面宜平整，无障碍。

3 隐患上部不应存在高电导率屏蔽层。

4 测区内不宜有大型金属构件或较强的电磁干扰。

5 隐患规模及埋藏深度应在探地雷达的有效探测范围内；隐患垂直方向上的厚度应大于探测时电磁波在周边介质中有效波长的 $1/4$ ，水平方向上的长度应大于电磁波在周边介质中的第一菲涅尔带直径的 $\pm 1/4$ 。

6 需识别两个水平相邻的隐患时，隐患间的最小水平距离应大于第一菲涅尔带直径。

7 宽角法与共中心点法测线范围内，目标层底界面宜与测试表面近似平行，测试的介质应均匀。

8 孔内探测时，钻孔应无金属套管。

9 三维雷达探测工作面应满足探测隐患空间分布范围的要求。

10 介质电磁波速度应按下列方法确定：

1) 利用地层参数计算。

- 2) 由钻孔或已知深度的目标体标定。
- 3) 用线状目标体几何扫描法推算。
- 4) 用两临空面透射或钻孔透射等透射法、宽角法或共中心点法确定。

6.0.4 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 雷达主机应符合下列规定：

- 1) 脉冲重复频率不应小于 100kHz。
- 2) 仪器增益不宜小于 150dB。
- 3) 数据采集记录位数不应小于 24bit。
- 4) 最小采样间隔不应大于 0.05ns。
- 5) 应具有自动和手动增益调节功能，增益点数不应少于 3 个。
- 6) 应具有 32 次以上信号静态叠加功能。
- 7) 应具有滤波功能。

2 雷达天线应符合下列规定：

- 1) 中心频率宜为 16~1600MHz。
- 2) 天线中心频率允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。
- 3) 用于孔内探测的天线，水密性应大于 1MPa。
- 4) 频带低值不应大于中心频率的 1/4，高值不应小于中心频率的 2 倍。

6.0.5 外业工作应符合下列规定：

1 地表二维探测应符合下列规定：

- 1) 普查时，点测模式下测点间距应为 0.5~1.0m，连测模式下天线的移动速率宜采用较大值。
- 2) 详查时，点测模式下测点间距应为 0.1~0.5m，连测模式下天线的移动速率宜采用较小值。
- 3) 探测堤身内部隐患时，应根据探测深度和分辨率合理选择中心频率。
- 4) 探测护坡脱空及破坏范围时，宜选用中心频率 250MHz 及以上的天线。

- 5) 记录时窗宜按最大探测深度与上覆介质平均电磁波速度之比的 2.5~3.0 倍选取。
- 6) 采样率宜为天线频率的 15~20 倍。
- 7) 剖面法探测时天线标示的测量方向应与测线方向一致，天线中心线偏离测线的距离不应大于天线宽度的 1/3。
- 8) 宽角法与共中心点法天线移动步长应小于电磁波在测试介质中有效波长的 1/4，并按设计测试步长预先标识测点位置，发射和接收天线最大距离宜大于反射界面埋深的 2 倍。
- 9) 探测过程中，天线宜紧贴探测面，保持耦合良好。
- 10) 连续测量时，天线的移动速度应均匀，并与仪器的扫描率相匹配，天线移动速度宜为 6~20m/min，每 10m 应至少校对 1 次测量桩号，允许误差为 ±1%；点测采样时应保持天线静止。
- 11) 测线定位标注应与测线桩号一致，应避免仪器线缆干扰天线工作信号。
- 12) 应记录测线上及邻近处存在的可能对雷达测量造成影响的物体及环境因素。
- 13) 多天线探测时应保证各天线测线重合。

2 钻孔雷达探测应符合下列规定：

- 1) 钻孔位置应根据探测目的、工程及地球物理条件布置。
- 2) 对隐患方位定位时，应采用 2 孔或 3 孔测量方式，采用 3 孔测量方式时宜在平面上按三角形布置。
- 3) 探测距离小于 10m 时，宜选择收发一体天线；探测距离大于 10m 时，宜选择分体式天线。
- 4) 探测孔宜采用地质钻造孔，孔径不应小于 56mm，孔深应深入探测下限 5m 以上。
- 5) 探测前宜进行探孔并测量孔斜。
- 6) 探测时宜保持探测孔段满水或无水状态；孔中有水时，应记录水深位置。

- 7) 电缆应进行深度标记;
- 8) 点测时, 测点间距宜为 20cm;
- 9) 连续测量时, 天线移动应保持匀速, 移动速度宜为 4~6m/min;
- 10) 探测过程中, 每 10m 应校对一次孔深, 允许误差为 ±1%。

3 三维雷达探测应符合下列规定:

- 1) 应根据隐患平面范围和埋深确定测网面积并标识;
- 2) 网格密度应根据目标体大小确定, 测线间距宜相等, 且应保证同一方向有 3 条测线经过目标体;
- 3) 使用三维雷达矩阵天线探测时, 相邻测线搭接宽度不宜小于矩阵宽度的 1/4;
- 4) 现场探测应按事先标识的测网有序实施, 各探测仪器工作参数应保持一致;
- 5) 单条测线的探测工作应符合 6.0.5 条 1 款的规定。

6.0.6 检查观测应符合下列规定:

- 1 检查测试的雷达参数设置、测试方式、测线位置、测段桩号等应与原始测试时相一致。
- 2 提供检查和评价的雷达资料应经初步编辑, 编辑内容含测线号、里程桩号、剖面深度等。
- 3 检查观测的图像与原始图像的异常形态和位置应基本一致, 且 2 次观测的同一异常水平位置在工作比例尺的平面图上应保持不大于 1mm, 异常埋深位置相对误差不应大于 10%。

6.0.7 数据处理应符合下列规定:

- 1 应对探测数据进行压制干扰信号、突出反射波、地形校正等处理; 处理方法可选用数字滤波技术、偏移绕射处理技术、图像增强技术等。
- 2 数据道水平比例不一致、且存在位置标记时, 应进行水平比例归一化。
- 3 频率滤波可选择低通滤波、高通滤波或带通滤波; 低频

截止频率宜取大于天线中心频率的 1/4，高频截止频率宜取小于天线中心频率的 2 倍。

4 对多次反射波宜采用反褶积处理方法压制；当反射信号弱、数据信噪比低时不宜进行反褶积处理。

5 点平均处理时，参与平均的点数宜为奇数，点数最大值宜小于采样率与低通频率的比值。

6 处理宽角法和共中心点法反射波记录时，应先根据目标反射界面深度和双曲线特征对反射波进行识别，时间值读取宜选择波形起跳点、波峰、波谷等特征点位置；电磁波速度计算应参考附录 B 的规定。

7 三维探测各剖面数据处理完成后应形成三维图像；宜根据隐患的三维尺寸设定层析切片间距，制作切片图、截面图、剖面图，并标记目标体空间位置。

6.0.8 资料解释应符合下列规定：

1 资料解释包括辨认和追踪有效波的同相轴、反射波的提取、有效异常的确定、隐患分类原则等。

2 宜通过已知信息与雷达图像对比，建立测区探测对象的反射波组特征，然后应用于其他剖面的识别解释；宜根据反射波组的波形和能量特征追踪同相轴，识别反射波组界面。

3 单个异常体可根据波形双曲线形态、能量和频率特征进行识别。

4 同一测区有多条测线时，应比较相邻测线的雷达剖面图，识别相似图像特征的反射信息，进行比对及综合分析。

5 钻孔雷达探测解释应排除地面及水面造成的形态为 45° 的强反射同相轴的干扰波，多孔探测时宜根据多个单孔雷达图像上的目标体信号位置综合判断目标体方位。

6 三维雷达探测数据应进行振幅、频率以及相位等属性分析；并利用三维数据体显示功能进行隐患的空间形态分析，三维建模。

7 应依据土壤介质的电磁波速度参数进行时深转换，确定

隐患埋深，隐患的性质宜结合地质资料确定。

8 成果图件应包括雷达解释剖面图、隐患探测成果表、堤身质量分类表、综合成果图等；雷达解释剖面图上应标明堤身高度，探测点的位置以及隐患的性质、位置和埋深，宜标明现场干扰源的位置和类型。

7 拟流场法

7.0.1 拟流场法可用于渗漏、管涌进水口部位探测。

7.0.2 采用拟流场法探测时，水深应大于0.5m；渗漏类型应为具有一定渗漏量和流速的集中渗漏，渗漏出口与入口应存在水流联系。

7.0.3 仪器性能应符合下列规定：

1 发送机输出波形应为方波或双频波，频率稳定性不应大于 $1\times10^{-5}/\text{h}$ 。

2 最大发送电压不应小于90V，最大发送电流不应小于500mA。

3 接收机中心频率 f_c 应满足 $\Delta f \geq 3\text{dB}$ 带宽，测试电流密度的灵敏度不应小于 0.1mA/m^2 ，输入阻抗不应小于 $150\text{k}\Omega$ ，对50Hz工频干扰抑制不应小于50dB。

4 接收机连续工作时间不宜小于7h。

7.0.4 外业工作应符合下列规定：

1 现场观测可采用走航式连续观测或点测方式；测线宜按网格状布置，测线间距宜为1~5m，点距宜为1~2m；在异常位置附近宜加密测线和测点，间距可加密至0.5m。

2 供电电极A应置于渗漏出水口；有多处渗漏时，可在每一渗漏处各布置1个电极，然后将各电极并联；供电电极B应置于离查漏区域较远水体中。

3 供电导线宜使用直径1.5~2.5mm的多芯铜线。

4 探测前应测量感应探头电阻，电阻应大于 $100\text{k}\Omega$ 。

5 船只宜采用非金属的橡皮艇、木板船，载人量宜为3~5人；探测过程中，探测人员必穿戴救生衣，船只必配备救生圈等安全装备。

6 发现有效异常时，应设置浮标定位或者记录GPS坐标。

并重复观测。

7 测线距离宜为1~5m。

8 工作中，供电电流宜为400~500mA。

9 发送机供电电流强度应保持稳定，电流强度变化幅度不应超过2%。

7.0.5 数据处理应符合下列规定：

1 资料整理时，应检查数据是否完整，计算原始观测与检查观测的相对误差。

2 成果图件应包括流场法观测信号强度平面剖面图或平面等值线图。

3 平面剖面图的横坐标应为堤防桩号，比例尺宜取1:1000；纵坐标应为渗漏信号强度值，比例尺应根据背景值确定。

4 绘制视信号强度剖面图可采用圆滑技术。

5 背景值宜根据信号强度曲线平稳程度，采用数理统计方法选取，相对异常不小于2倍背景值时可判定为有效异常。

7.0.6 资料解释应符合下列规定：

1 成果图应标明线号、测线离堤防的距离、渗漏位置和性质等。

2 成果报告宜说明管涌渗漏发生时间、流量以及处理方式，并简要介绍管涌发生堤段的基本情况。

8 弹性 波 法

8.1 反 射 波 法

8.1.1 反射波法可选用纵波反射法和横波反射法。

8.1.2 反射波法可用于堤防结构和隐患探测，可探测松散体、洞穴、高含砂层、护坡或闸室底板脱空等。

8.1.3 采用反射波法探测堤防隐患应符合下列条件：

1 堤防隐患与背景介质之间应有明显的波阻抗差异且物性稳定。

2 层状目标体厚度应大于有效波长的 1/4，孤立目标体尺寸应大于有效波长的 1/2。

3 隐患的埋深及规模应在地震反射波法探测深度内，反射波及逆散射信号应清晰可辨。

8.1.4 开展反射波法探测可采用数字地震仪或其他专用仪器，仪器主要技术指标应符合下列规定：

1 地震仪主机应符合下列规定：

- 1) 仪器通道数不应少于 12 道。
- 2) 采样间隔可选，最小采样间隔应小于 0.1ms。
- 3) 记录长度可选，每道最少样点数不应小于 1024 点。
- 4) 模数转换精度不应低于 24bit。
- 5) 放大器动态范围不应低于 96dB。
- 6) 放大器频率响应宜为 0.5Hz~20kHz。
- 7) 放大器各通道间相位时差应小于采样间隔的 1/2，振幅差应小于 5%。

2 检波器应符合下列规定：

- 1) 应选用与探测方法匹配的速度型检波器，灵敏度应大于 30V/(m/s)。
- 2) 纵波反射法宜选用固有频率不低于 100Hz 的垂直检

波器。

- 3) 横波反射法宜选用固有频率为40~60Hz的水平检波器。
- 4) 各道检波器灵敏度相差应小于5%，固有频率差小于5%，相位差小于0.5ms。

3 震源应符合下列规定：

- 1) 可采用锤击震源、落重震源和可控震源。
- 2) 应能激发所需的主频地震脉冲，满足探测深度要求。
- 3) 锤击震源和落重震源应操作方便、重复性好。
- 4) 横波探测时可采用扣板震源。

8.1.5 外业工作应符合下列规定：

1 信号激发接收应符合下列规定：

- 1) 探测深度较大时，宜选用纵波反射法；在浅部松散含水地层探测时，宜使用横波反射法。
- 2) 在满足探测深度要求时，宜使用较高频段的震源和固有频率较高的检波器。
- 3) 激发点宜选在较密实的地层上，或预先夯实；锤击板应与地面接触良好。
- 4) 使用横波叩板震源时，木板长轴应垂直测线，且长轴中点应在测线或测线延长线上，木板上应压足够重物并可安装抓钉，保持叩板与地面接触牢固。
- 5) 检波距应通过试验确定，宜采用1~5m；检波距、排列长度在同一测线上应一致。
- 6) 检波器布设应位置准确，安置牢固，埋置条件一致，防止背景干扰；用水平检波器接收横波时，应保证检波器水平安置，灵敏轴应垂直测线方向，且取向一致。

2 观测系统应符合下列规定：

- 1) 可采用单边或双边展开排列观测系统，选择反射最佳窗口，确定偏移距和检波点距。
- 2) 工程条件较简单，反射层位较稳定时，宜采用等偏移距观测系统，偏移距宜选在反射波窗口的中部。

3) 观测条件比较复杂的测区，宜采用具有一定偏移距离的多次覆盖观测系统，覆盖次数不应小于 6 次。

3 记录质量控制应符合下列规定：

- 1) 当信噪比较低时，宜分析干扰来源，采取降低放大倍数、增大激发能量等措施提高信噪比。
- 2) 遇到局部测段记录质量变差时，应分析原因，重新选择仪器工作参数或改变工作方法。

8.1.6 数据处理应符合下列规定：

1 数字滤波应符合下列规定：

- 1) 应在频谱分析的基础上选择滤波频率。
- 2) 应调整滤波频带宽度，提高信噪比和分辨率。
- 3) 隐患多发地段数据处理时，不宜采用叠前二维滤波，应避免横向混波对地震波动力学特征的影响。

2 速度分析和叠加速度选取应符合下列规定：

- 1) 可使用速度谱或速度扫描求取叠加速度，当探测条件复杂时，宜用 2 种方法互为校核。
- 2) 速度扫描时，应选取信噪比高的地震记录，并应采用较小的速度增量。
- 3) 测段数量、长度应满足开展速度分析的要求，并应绘制速度展开图；速度横向变化规律分析可结合速度测井资料开展。
- 4) 对水平叠加效果欠佳的地段，应对该段叠加速度做必要的修改。

3 有效波对比分析应符合下列规定：

- 1) 有效波振幅宜大于干扰波振幅的 2 倍，并应选择有效波的起始相位采用相位追踪对比分析。
- 2) 对不同层位地震有效波应根据波形相似性、视周期相近性、振动连续性和同相性以及波的振幅远离震源点衰减的规律性等特征进行对比分析。
- 3) 确定平均速度或有效速度时应分析近表层介质不均匀

性和低速带与下伏层厚度的相对变化的影响。

4 处理方法选择应符合下列规定：

- 1) 有效反射波组之间振幅强弱悬殊的记录，应进行信号振幅归一处理。
- 2) 深部反射信号与表层初始信号之间振幅强弱悬殊时，应进行剖面均衡处理。
- 3) 当反射界面倾角较大时，可进行偏移叠加或叠加偏移。
- 4) 当测区地质情况比较复杂时，宜采用地震反射与散射联合成像方法；成像单元边长宜设置为0.2m，叠加半径不应小于检波距，宜为2~10m。

8.1.7 资料解释应符合下列规定：

1 反射波资料解释的基础图件应符合下列规定：

- 1) 图上应注明堤防名称、测线编号及桩号、偏移距、检波点距。
- 2) 时间剖面典型测段应附展开排列记录。
- 3) 等偏移距剖面图应注明是否经动校正处理及动校正速度值。
- 4) 联合成像剖面图应说明成像单元边长、叠加半径及深度波速变化。

2 堤防结构层位和各种隐患分布位置和性质应依据剖面成像基础图件确定，并应与地质和其他探测资料对比分析；对目标体应标注编号。

3 堤防结构、隐患等目标体的性质、形态、位置可根据时间剖面图中波组分叉、合并、中断、尖灭等现象分析确定。

4 成果应包括观测系统布置图、波速扫描分析图、叠加时间剖面图和色谱图、地质分析解释成果图表；解释成果图宜包括锥探、钻孔或其他验证资料。

8.2 折 射 波 法

8.2.1 折射波法可选用纵波折射法和横波折射法。

8.2.2 折射波法可用于测定堤防堤身和堤基介质的纵、横波速度，由纵、横波速度判定堤防填筑介质的密实度。

8.2.3 采用折射波法探测堤防隐患应符合下列条件：

1 被追踪层的波速应大于上覆各层的波速，并具有一定的厚度。

2 沿测线被追踪层视倾角与折射波临界角之和应小于 90° 。

3 被追踪层界面起伏不大，折射波沿界面滑行时无穿透现象。

8.2.4 仪器设备性能和指标应符合 8.1.4 条的规定。

8.2.5 外业工作应符合下列规定：

1 观测系统应符合下列规定：

1) 采用单支时距曲线观测系统时，被追踪层界面的视倾角应小于 15° ，并应保证被追踪地段内至少有 4 个检波点接收折射波。

2) 采用单重相遇观测系统应保证被追踪层的相遇时距曲线段至少有 4 个正常检波点。

3) 采用多重时距曲线观测系统时，应保证各层折射波的连续对比追踪，并在综合时距曲线上均有独立解释的相遇段。

4) 利用追逐时距曲线补充折射波资料时，应保证在被追踪段至少有 4 个检波点重复接收同一界面的折射波。

5) 宜在测线每 100m 测段两端进行有效速度测试，当发现相邻速度差超过 20% 时，应在该测段内增加速度测试。

2 原始记录存在下列缺陷之一的，应判定为不符合测试要求的记录：

1) 不能可靠追踪初至有效波的记录。

2) 同一记录上，使用道数的 $1/6$ 以上或相邻道工作不正常。

8.2.6 数据处理应符合下列规定：

1 弹性波走时读取应符合下列规定：

- 1) 在波的干扰或置换位置，应分析波的叠加特征后正确读取波的初至时间。
- 2) 直接读取初至时间有困难时，可读取有效波第一个极值时间并进行相位校正。
- 3) 应在典型波形记录的每道初至之前标注走时值，并在初至点打上标记。

2 时距曲线绘制应符合下列规定：

- 1) 互换道或连接道之间同相位的时间差，经震源深度校正后应小于3ms。
- 2) 根据追逐时距曲线经校正拼接后，综合时距曲线互换时差应小于5ms。
- 3) 绘制时距曲线前，应对走时数据进行相位校正、震源深度校正、表层低速带校正。

3 依据测区地震地质条件和记录特点，处理方法应符合下列规定：

- 1) 应由相遇时距曲线求取界面速度和界面深度，当条件不满足时，可采用单支时距曲线截距时间法或临界距离法求取界面深度。
- 2) 当地面起伏较大时，宜采用 t_0 法或延迟时法；当折射界面起伏较大时，宜采用时间场法或共轭点法；处理方法可参照SL/T 291.1执行。
- 3) 对于堤防结构复杂或具有较多的隐患类型时，宜采用多种计算解释方法和波路追踪正演拟合方法综合求解。
- 4) 确定平均速度或有效速度时应分析近表层不均匀性的影响，根据速度沿测线变化的曲线进行时深转换。

8.2.7 资料解释应符合下列规定：

- 1 确定波速界面与地质界面的对应关系应以钻孔资料或物性资料为依据。
- 2 用速度变化推断水平方向介质变化，应有物性和地质资

料为依据。

3 确定速度带与堤防填筑土体密实度的对应关系，应分析速度带上有无伴随振幅增减和波形变化等现象。

4 成果图件宜包括地震波速地质剖面图等，成果图宜包括测线上的锥探、钻孔或其他验证资料成果。

8.3 瑞雷波法

8.3.1 瑞雷波法可采用瞬态法和稳态法。

8.3.2 瑞雷波法可用于探测堤防松散体、洞穴、护坡或闸室底板脱空等，也可测定堤防介质的动弹性力学参数并对饱和砂土液化进行判定。

8.3.3 采用瑞雷波法探测堤防隐患应符合下列规定：

1 被探测地层与其相邻层之间、隐患与背景介质之间应存在明显的波速差异。

2 被探测地层应为横向相对均匀的层状介质。

8.3.4 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 应选用不少于2道的浅层数字地震仪。

2 稳态法所用震源应具有频率可控功能，变频范围应满足探测要求。

3 检波器固有频率和频宽应与探测深度相符，速度型检波器固有频率宜为 $1\sim 10\text{Hz}$ 。

4 仪器宜具有连接IEPE型加速度传感器功能，传感器频率响应范围宜为 $0.5\text{Hz}\sim 10\text{kH}\text{z}$ 。

8.3.5 外业工作应符合下列规定：

1 信号激发接收应符合下列规定：

1) 测点间距宜为 $10\sim 50\text{m}$ ，重点或异常堤段可适当加密；应使用宽频带震源。

2) 探测中遇到局部堤段记录质量变差时，应分析原因并通过试验重新选择仪器工作参数。

3) 接收仪器应设置全通，采样间隔应小于面波最高频率

的半个周期，时间测程应包括最远道低频面波的最大波长。

- 4) 宜采用展开排列方式分析有效波和干扰波分布特征，试验干扰波压制方法，选择激发与接收方式和仪器工作参数及观测系统等。
 - 2 观测系统应符合下列规定：
 - 1) 稳态瑞雷波法应采用变频可控震源单端或两端激发，调整两个检波器间距和偏移距进行接收，取得不同频率的多种组合瑞雷波记录。
 - 2) 瞬态瑞雷波法应采用锤击、落重震源，在排列的单端或两端激发，可用 12 道或 24 道为一排列进行接收；也可使用 2 通道或多通道以共中心点方式接收多个信号对组成排列。
 - 3) 信号采集宜采用变偏移距和检波距方式；小偏移近距离高頻信号和大偏移远距离低頻信号可分别探测浅部和深部目标。
 - 4) 应通过试验选择合适的偏移距和检波点距，排列长度应大于探测深度，检波点间距应小于目标体规模，检波点间距、排列长度在同一测线上宜保持一致。
 - 3 存在下列缺陷之一者应为不合格记录：
 - 1) 近源道波形出现削波、坏道或排列中连续两道为坏道。
 - 2) 记录长度不满足采集最大炮检距基阶面波的记录。
 - 3) 记录编号或主要内容与外业工作情况不符，又无法改正的记录。
- #### 8.3.6 数据处理应符合下列规定：
- 1 稳态法波速度计算应选择位于震源点同一侧的两个检波点上的记录，从高频至低频，逐个读取两个记录中瑞雷波的时间差或相位差计算瑞雷波速度，以两个检波点连线的中心为探测点绘制频散曲线。
 - 2 瞬态法宜选用相位差法、频率波数法和频率波速法计算

绘制瑞雷波频散曲线，可选用近似法或法极值点法求取层速度、一次导数法或拐点法求取层厚度。

3 频率—波速曲线的处理，应以排列共中心点为测点，对变偏移距和检波距信号对进行叠加；宜使用频谱细化技术。

4 使用共激发点排列接收信号时，数据宜采用变偏移距叠加处理。

8.3.7 资料解释应符合下列规定：

1 瑞雷波的深度转换可选用半波长法，也可参照测区已有资料按泊松比校正。

2 频散曲线应以瑞雷波的频率为纵轴、瑞雷波的速度为横轴绘制波速—频率曲线，也可绘制波速—深度曲线。

3 剖面测试时，应将波速—深度曲线按比例绘制在同一剖面上，也可根据最后反演计算的层速度和层深度绘制瑞雷波速度剖面等值图、色谱图。

4 瑞雷波速度和横波速度转换可按附录 B 中 B.0.11 条计算。

5 波的对比应符合下列规定：

1) 波的对比宜采用多相位对比，应辨认和追踪瑞雷波同相轴变化趋势。

2) 不同频率瑞雷波对比分析应包括波形相似性、视周期相近性、振动连续性和同相性、振幅随远离震源点衰减规律性等特征对比。

3) 应根据瑞雷波频散特征，在时间域和频率域综合对比分析。

6 成果应包括观测系统布置图、实测波形图、频散曲线图、剖面波速等值线图、地质分析解释成果图表；成果图宜包括测线上的锥探、钻孔或其他验证资料成果。

9 水下探测方法

9.1 水下结构探测方法

9.1.1 探测方法可选用水下摄像法、声呐法、示踪法、ADCP 法。

9.1.2 探测内容可包括岸坡、渠道、闸门及其门槽等水下建筑物缺陷，水下阻塞、堆积、沉积物分布以及水下结构附近水体的流速、流向等。

9.1.3 开展水下结构探测应符合下列规定：

1 开展水下摄像探测时，水下环境能见度宜大于 0.5m。

2 声呐、ADCP 仪器设备应选择合适载体，水下与水域环境宜相对开阔。

3 开展一般水下探测工作时，水流速不宜超过 1.5m/s；水下精细探测工作宜在静水中开展。

4 示踪法宜采用颜料示踪剂。示踪剂应环保无毒、色泽鲜明、易于辨认。

9.1.4 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 水下摄像仪器设备应包括图像采集装置、照明装置、数据记录或传输装置；成像分辨率应大于 200 万像素，耐压水深应大于 300m，应配有照明装置，应具有图像实时传输功能。

2 二维图像声呐仪器设备应包括声呐探头、控制单元、数据记录装置，宜搭载在水下机器人或支架上使用；工作频率应大于 900kHz，距离分辨率应优于 2.5cm，扫描角度应大于 120°，波束宽度应小于 $1^\circ \times 30^\circ$ ，最大扫描距离应大于 15m，耐压水深应大于 300m。

3 三维成像声呐仪器设备应包括声呐探头、控制单元、数据记录装置，宜搭载在水下机器人或支架上使用；工作频率应大于 1300kHz，距离分辨率应优于 1.5cm，波束宽度应小于 $1^\circ \times 1^\circ$ ，扫描距离应大于 10m，耐压水深应大于 300m。

4 多波束声呐仪器设备应包括探头、控制单元、数据记录装置，宜搭载在测量船上使用；工作频率应大于400kHz，波束应小于 $0.5^\circ \times 1^\circ$ ，波束条带宽不应大于 15° ，波束数目不应少于256个，距离分辨率应优于2.5cm，最大量程不应小于500m，耐压水深应大于100m，宜具有横摇/纵摇补偿功能且补偿精度宜高于 0.5° 。

5 侧扫声呐仪器设备应包括探头、控制单元、数据记录装置，宜搭载在测量船上使用；工作频率应大于400kHz，水平波束宽度应小于 0.3° ，换能器安装角应低于 15° ，量程应大于150m，航迹分辨率应优于0.005h，垂直航迹分辨率应优于1.25cm，耐压水深应大于100m。

6 三维实时声呐仪器设备应包括探头、控制单元、数据记录装置，宜搭载在测量船上使用；工作频率应大于300kHz，波束数目不应少于16000个，波束角应小于 0.39° ，最大量程应大于80m，距离分辨率应优于2cm，耐压水深应大于250m，应具备横摇、纵摇补偿功能，宜配置2自由度水下云台。

9.1.5 工作布置应符合下列规定：

1 水下摄像宜在水下工程重点区域开展；测线宜在检测区域内呈S形布置，检测管道类区域宜按环状测线进行覆盖检查，相邻测线重叠覆盖面积应超过20%。

2 二维图像声呐检测时，宜根据现场待检区域安排支架位置和探头方向，必要时可配合水下云台使用；采用水下机器人作为载体时，宜根据待检工程结构情况安排检测次序。

3 三维成像声呐探测采用多次探测数据拼接时，各站数据重叠覆盖面积不应小于20%。

4 多波束声呐和侧扫声呐的主测线宜平行检测区域长轴方向布设；相邻测线数据重叠覆盖面积不应小于20%；应在垂直主测线方向布置联络测线，长度应大于主测线长度的5%。

5 三维实时声呐测线宜平行于检测目标水平方向布置；相邻测线数据重叠覆盖面积不应小于20%；可采用坐点扫描方式

或以水下机器人做载体进行动态扫描。

6 开展示踪剂法探测时，示踪剂应在水流源头或上游位置投放，在周边或下游区域开展观测。

9.1.6 外业工作应符合下列规定：

1 水下摄像应符合下列规定：

- 1) 作业前应进行准备和检查工作。
- 2) 检测工作过程中应对设备进行水下定位。
- 3) 摄像装置宜贴近水下建筑物；摄像范围应根据探测对象特点确定。
- 4) 发现缺陷部位应及时记录、定位和重点观察；发现渗漏时，宜结合水下喷墨设备，观察颜料吸入情况。

2 二维图像声呐探测应符合下列规定：

- 1) 测量方式、测站或测线布置应根据现场环境和探测目的确定。
- 2) 探头类型、频率和工作方式应根据探测要求选择。
- 3) 探测中发现异常部位时应进行重复扫描。

3 三维成像声呐探测应符合下列规定：

- 1) 探头类型、频率和工作方式应根据探测目的选择，采集前应进行工作水域声速测定。
- 2) 应根据现场环境和检测目的规划测站和测线位置。
- 3) 可通过布置强反射定位标靶提高探测效果。

4 多波束声呐和三维实时声呐探测应符合下列规定：

- 1) 外业工作宜参照 JT/T 790 执行，水下构筑物缺陷检测精度应达到特等测量等级要求。
- 2) 探测时应记录仪器位置信息；探测前后应记录测区水位。
- 3) 仪器设备安装和固定应符合厂家的技术要求，并记录安装位置参数。
- 4) 正式作业前应进行系统稳定性试验，重复观测差值在水深小于 30m 时应小于 0.6m，水深大于 30m 时应小

于水深的 2%。

5) 每次探测前后应测量换能器吃水深度, 测量误差应小于 5cm; 应测量代表性区域声速剖面, 测量误差应小于 1m/s。

6) 测船最大航速应根据数据更新率、波束脚印和测区水深确定; 测船在探测区域内应保持匀速直线航行。

7) 探测过程中应实时记录探测数据、监控数据覆盖情况和质量; 信号质量不稳定时, 应及时调整多波束发射和接收单元参数; 必要时宜补测或重测。

5 側扫聲吶探測應符合下列規定:

- 1) 外業工作宜參照 JT/T 1362 执行; 探頭宜採用船側固定安裝方式, 記錄儀應接地良好; 探測前應在代表性區域調試, 合理設置採集參數。
- 2) 探測過程中, 測量船應保持勻速、直線航行, 船速應低於 3km/h; 探測過程宜記錄定位信息。
- 3) 探測過程中應及時檢查探測數據質量, 數據覆蓋不足或漏測、信號質量不滿足要求時, 應及時進行補測或重測。

6 示踪法檢測應符合下列規定:

- 1) 示踪劑釋放裝置载体可採用水下機器人; 噴嘴應固定在攝像頭前方。
- 2) 應實時記錄示踪劑運動情況; 探測裂縫、結構縫或混凝土破損部位時應錄像, 并對缺陷部位進行示踪檢查; 應根據示踪劑的運動特徵判斷滲漏情況。
- 3) 普查時, 可對滲漏區域進行單次噴墨; 確定滲漏部位後, 可對滲漏區域進行連續噴墨; 可通過示踪劑連續吸入時間和吸入速率判斷滲漏程度。

9.1.7 數據處理應符合下列規定:

- 1) 水下影像數據應進行回放分析, 截取缺陷部位視頻; 可對成果進行圖像增強處理。

2 多波束声呐数据处理应确认原始数据完整性，剔除不合格数据，进行水深改正。

3 侧扫声呐数据处理应确认数据完整性、进行数据校正；应绘制侧扫声呐条幅平面图，并进行数据拼接，绘制侧扫声呐镶嵌图。

4 二维图像声呐数据应进行回放分析，标识目标体信号。

5 三维成像声呐数据应进行噪声处理、数据拼接处理、三维建模处理。

6 三维实时声呐数据处理应确认数据完整性，剔除不合格数据，进行数据校正。

9.1.8 资料解释应符合下列规定：

1 宜进行水下探测数据对比分析。

2 水下摄像成果解释应判断缺陷位置、规模和性质。

3 多波束声呐资料解释应分析探测对象的异常情况。

4 侧扫声呐资料解释应分析水底或建筑物表面特征。

5 二维图像声呐资料解释应分析目标体规模、位置。

6 三维成像声呐资料解释应根据建模数据分析探测对象尺寸、位置及缺陷情况。

7 三维实时声呐资料解释应分析探测对象外形变化和异常情况。

9.1.9 探测成果应符合下列规定：

1 水下摄像成果宜包括水下摄像编辑资料、缺陷位置分布图等。

2 二维图像声呐成果宜包括二维声呐图像及对应的解释图件。

3 三维成像声呐和三维实时声呐成果宜包括三维数据模型图及局部放大图、典型断面图、平面等值线图及缺陷分布图等。

4 多波束声呐成果宜包括水深图、三维数字高程模型图、典型断面图及缺陷分布图等。

5 侧扫声呐成果宜包括侧扫声呐镶嵌图及解释图，应根据

成果分析水底或建筑物表面特征。

9.2 水下浅地层探测方法

9.2.1 水下浅地层探测宜采用浅地层剖面仪进行走航式探测；可进行堤岸防护工程水下基础缺陷等探测。

9.2.2 开展水下浅地层探测应符合下列规定：

- 1 水深大于2m，且满足仪器设备载体航行条件。
- 2 噪声干扰不应影响信号识别和记录解释。

9.2.3 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

- 1 工作频率范围宜为1~24kHz；
- 2 地层穿透深度大于30m，浅地层剖面仪的声源级宜满足GB/T 12763.8中浅水型浅地层剖面仪的要求；
- 3 分体式发射和接收换能器间距不宜大于1m；采用2个以上接收换能器时，应在叠加处理时进行校正；采用2个以上接收换能器时，应考虑换能器的间距、排列方向等影响，并在叠加过程中进行校正。

9.2.4 外业工作应符合下列规定：

- 1 探测区域水底地层为砂砾石层、砂层等砂质地层时，地层分层及地层内目标体探测不宜使用浅地层剖面仪。
- 2 仪器安装应满足HY/T 253的要求。
- 3 应保证单位距离内的采样点数达到工程任务要求。
- 4 开展水下探测工作前，应对水底地层的波速特征进行分析。
- 5 探测前后应记录水位高程，探测过程中应记录定位信息。
- 6 测线设计应根据工程情况确定；测量过程中，拖鱼与测线的水平位置偏差宜小于1m。

9.2.5 数据处理应符合下列规定：

- 1 探测数据处理应包括数据回放、波形分析、界面追踪。
- 2 可对探测图像进行裁剪、拼接处理。

9.2.6 资料解释应符合下列规定：

1 可通过同相轴追踪方法判断地层分界面和目标体位置；
可根据反射信号特征判断反射界面性质。

2 成果图件应包括探测轨迹图、地层剖面图、目标体分布图。应结合堤防水上结构测量和水下浅地层剖面探测成果，绘制标准断面图；开展根石探测时，可根据各断面图成果计算根石缺失量。

10 温度场法

10.0.1 温度场法可用于渗漏通道出口、背水堤坡散浸部位的定位。

10.0.2 采用温度场法探测堤防隐患应符合下列条件：

- 1 渗漏水体与环境温度存在温差。
- 2 渗漏水体未被植被等物体完全遮挡。

10.0.3 温度场法可采用红外测温仪、热成像仪、激光测温仪等非接触式测温设备。

10.0.4 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

- 1 宜具有实时成像功能。
- 2 应具有现场温度显示、数据记录功能。
- 3 测温范围宜为0~50℃；测温分辨率应小于0.5℃。

10.0.5 外业工作应符合下列规定：

- 1 堤防背水面、堤脚和其他可能出渗部位宜采用巡查式探测。
- 2 现场检测前应对仪器进行检查或校正。
- 3 应分析地貌、植被对温度测量值的影响；发现温度异常部位应及时检查确认。
- 4 宜与车辆、无人机等载体及定位设备配合使用。

10.0.6 探测成果应符合下列规定：

- 1 应记录温度异常区域位置、分布范围、环境温度、异常温度、人工检查结果。
- 2 宜保存温度成像成果和现场图像、视频资料。

11 同位素示踪法

11.0.1 同位素示踪法可选用单孔稀释法、单孔示踪法和多孔示踪法。

11.0.2 同位素示踪法适用范围可参照表 11.0.2 确定。

表 11.0.2 同位素示踪法适用范围

方法	适用范围
单孔稀释法	测定水平流速和流向，地层渗透系数；在已知水力坡降时，判断多含水层中的涌水含水层和涌水量；吸水含水层和吸水量以及各含水层的静水头高度；测定垂向流速和流向
单孔示踪法	适用于测定垂向流速和流向
多孔示踪法	测定地下水流向、孔间平均流速、平均孔隙度、计算地层弥散系数

11.0.3 渗漏水流速应大于 1×10^{-5} m/s。

11.0.4 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 当垂向流速大于 0.1m/d 时，垂向流速测试相对误差应小于 3%。当水平流速大于 0.01m/d 时，水平流速测试相对误差应小于 5%。

2 水平流速测试范围宜为 0.05~100m/d。

3 垂向流速测试范围宜为 0.10~100m/d。

11.0.5 外业工作应符合下列规定：

1 测试水文参数时，应选择合适的放射性同位素。测试地下水流速流向时，宜选用¹³¹I，每次投放量应低于 1×10^6 Bq。

2 测试渗透速度和流向应采用单孔稀释法，测试地层平均孔隙度，地层弥散系数等宜采用多孔示踪法。

3 开展多孔示踪法时，应事先估计投放点至检测点之间的距离、渗漏量、饱水层体积、孔隙度等基本参数；投放较大量的

放射性同位素时，应选用符合相关标准的放射性同位素，可选用¹³¹I，剂量范围宜为 $1 \times 10^9 \text{ Bq} \sim 100 \times 10^9 \text{ Bq}$ ；同位素应 1 次投放完毕。

4 同位素示踪法的测线和钻孔布置应符合 GB 50027 的规定；可在堤顶布置 1 条测线，钻孔沿测线布置；普查时，孔距宜为 100m；详查时，孔距宜为 50m，必要时可增加钻孔数量验证测量结果的准确性；可利用堤防已有的钻孔和观测孔开展测试。

5 现场测量时，测量仪器应进行本底测量、置零及现场测量方向校正。

6 垂直测点距离宜为 1m；发现异常点时，应进行多次重复测量。

11.0.6 数据处理和资料解释应符合下列规定：

1 钻孔中或井间人工同位素示踪测量时，应按附录 B 中 B.0.12 条计算渗透流速、流向及渗透系数。

2 成果图件应包括测区的流速矢量平面分布图；渗漏路径的剖面分布图；渗透流速、渗透系数沿各孔的高程分布图；与图件相对应的渗透流速、渗透系数以及渗流方向统计表。

12 钻孔全景光学成像法

12.0.1 钻孔全景光学成像适用于钻孔中观测地层岩性、结构和地质分层；观测孔壁洞穴、软弱夹层、裂隙发育、破碎等隐患分布；测定裂缝等的倾向、倾角等产状要素及裂缝分布密度、开闭程度等。

12.0.2 钻孔全景光学成像宜在无套管的干孔或清水孔中开展；当孔中、管中水质透明度不足时，应采用清水循环冲洗并加沉淀剂澄清；在冲洗沉淀达不到观测效果时可采用玻璃套管。

12.0.3 仪器设备性能和指标应符合下列规定：

1 摄像头分辨率不应低于 200 万像素，最低彩色成像照度不应大于 0.1 Lux。

2 钻孔内摄像角度应为 360° 。

3 摄像探头应配置三维姿态传感器，方位角精度应达到 1° ，倾角和滚角精度应达到 0.1° 。

4 成像仪器深度或距离计数的相对误差不应大于 0.5%；探头电缆应设定位标记，标记间隔宜为 1m。

12.0.4 外业工作应符合下列规定：

1 应现场记录工程名称、测试钻孔编号、工作日期等参数。

2 图像显示的深度相对误差不应大于 0.5%，与电缆标记的绝对误差不应大于 0.1m，应每隔 5m 进行一次深度校正。

3 记录图像应清晰可辨，且应显示图像的方位角和钻孔的倾角。

4 连续拍摄拼图成像时，探头移动速度不宜大于 3m/min。

12.0.5 数据处理应符合下列规定：

1 成果图像宜展开拼接成分段连续的图片；横向从左到右宜按北、东、南、西、北方向展开，并标注方位；垂向应标注深度或高程。

2 图像应清晰可辨，应对主要目标体进行追踪观察。

12.0.6 资料解释应符合下列规定：

1 裂隙、软弱夹层等的倾角、倾向及厚度应根据成果图像计算；孔斜顶角大于 5° 时，应利用孔斜测量资料进行校正。

2 成果资料应包括编辑后的图像和图片。

13 锥探法

13.0.1 锥探法可选择人工锥探法和机械锥探法。

13.0.2 锥探法可用于堤身探测和堤岸防护工程水下根石探测。

13.0.3 采用锥探法应符合下列条件：

1 探测区内无冻土层。

2 进行水下探测时，应具备稳定的工作平台。

13.0.4 设备应符合下列规定：

1 人工锥探法宜采用锥杆或导杆探测；机械锥探法宜采用根石探测机。

2 探锥应具有足够刚度，可选用钢筋锥或钢管锥。

3 探测深度在 10m 以内时，可采用钢筋锥；探测深度超过 10m 时，宜采用钢管锥。

13.0.5 外业工作应符合下列规定：

1 人工锥探法探测水下根石分布应符合下列规定：

1) 坝体上、下跨角应各设 1 个探测断面，圆弧段应设 1~2 个探测断面，迎水面应设 1~3 个探测断面。

2) 探测断面应与裹护面垂直，并设置固定的探测断面桩，每个断面不应少于 2 根桩。

3) 探测断面宜以裹护面顶部内侧为探测起点。

4) 沿断面水平方向应每隔 2m 设一个探测点，遇根石深度突变时，应增加测点。

5) 对水中进占或修建后曾靠河的工程，在滩面或水面以下的探测深度不应少于 8m；探测不到根石时，应向外 2m、向内 1m 各设置一个测点。

6) 测点应在断面上，沿铅垂方向锥探，根石深度精确到 0.01m。

7) 应测出坝顶高程、根石台高程、水面高程等数据，精

确到 0.01m。

2 开展机械锥探时，除应按上述步骤进行外，还应符合下列操作程序：

- 1) 操作前应进行设备检查和试运行。
- 2) 设备调试完毕后，开始下降探杆，当探杆上端接近限位装置 0.1m 时，停止探杆下降，接上一节探杆继续下降。
- 3) 当探测阻力明显增大、液压系统压力升高时，应启动振动电机。
- 4) 探杆头接触根石时，压力继电器动作，切断换向阀电源，液压马达停止工作，按下振动电机停止按钮，记录探测深度，完成一个点次的探测。
- 5) 抬起探杆，移动主机至下一个探测点。

3 开展水上探测时，当探测区内水体流速过大或环境风力过大时，应停止探测。

13.0.6 根石分布断面图应根据探测结果绘制，并计算缺石量。

附录 A 常用物性参数

A. 0.1 常见介质电阻率可参照表 A. 0.1 取值。

表 A. 0.1 常见岩土介质及水的电阻率参考值

单位: $\Omega \cdot m$

类别	名称	电阻率 ρ
松散土	黏土	$1\sim2\times10^2$
	含水黏土	$0.2\sim10$
	亚黏土	$10\sim10^2$
	砾石加黏土	$2.2\times10^2\sim7\times10^3$
	亚黏土含砾石	$80\sim240$
	卵石	$3\times10^2\sim6\times10^3$
	含水卵石	$1\times10^2\sim8\times10^2$
沉积岩	泥质页岩	$60\sim10^3$
	砂岩	$10\sim10^3$
	泥岩	$10\sim10^2$
	砾岩	$10\sim10^4$
	石灰岩	$6\times10^2\sim6\times10^3$
	泥灰岩	$1\sim1\times10^2$
	白云岩	$50\sim6\times10^3$
	破碎含水白云岩	$170\sim600$
	硬石膏	$1\times10^4\sim1\times10^6$
	岩盐	$1\times10^4\sim1\times10^6$
变质岩	片麻岩	$6\times10^2\sim10^4$
	大理岩	$10^2\sim10^5$
	石英岩	$2\times10^2\sim10^5$
	片岩	$2\times10^2\sim5\times10^4$
	板岩	$10\sim1\times10^2$

表 A. 0.1 (续)

类别	名 称	电阻率 ρ
岩浆岩	花岗岩	$6 \times 10^4 \sim 10^5$
	正长岩	$10^5 \sim 10^6$
	闪长岩	$10^5 \sim 10^6$
	辉绿岩	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$
	辉长岩	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$
	玄武岩	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$
常见水	河水	$10^{-1} \sim 10^2$
	地下水	$< 10^2$
	喀斯特水	$15 \sim 30$
	海水	$0.1 \sim 10$
	冰	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8$

A. 0.2 不同矿化水的电阻率可参照表 A. 0.2 取值。

表 A. 0.2 不同矿化水的电阻率参考值

矿化度/(g/L)	不同电解质水的电阻率/($\Omega \cdot m$)			
	NaCl	KCl	MgCl ₂	CaCl ₂
纯水	25×10^4	25×10^4	25×10^4	25×10^4
0.010	511	578	438	483
0.100	55.2	58.7	45.6	50.3
1.000	5.83	6.14	5.06	5.56
10.000	0.657	0.678	0.614	0.660
100.000	0.0809	0.0776	0.0936	0.0930

A. 0.3 常见岩土介质的密度及纵横波传播速度可参照表 A. 0.3 取值。

表 A.0.3 常见岩土介质的密度及纵横波传播速度参考值

类别	名称	密度 ρ (g/cm^3)	纵波速度 V_p (km/s)	横波速度 V_s (km/s)
松散层	黏土	1.60~2.04	1.2~2.5	0.7~1.4
	湿砂	—	0.6~0.8	—
	砂质黏土	—	0.3~0.9	0.2~0.5
	干砂、砾石	—	0.2~0.8	0.1~0.5
	饱水砂、砾石	—	1.5~2.5	—
沉积岩	砾岩	1.90~2.90	1.5~4.2	0.9~4.5
	泥质灰岩	2.25~2.65	2.0~4.0	1.2~2.3
	硅质石灰岩	2.80~2.90	4.4~11.6	2.6~3.0
	致密石灰岩	2.60~2.77	2.5~6.1	1.4~3.5
	页岩	2.30~2.70	1.3~4.0	0.8~2.3
	砂岩	2.42~2.77	4.5~5.5	0.9~3.2
	致密白云岩	2.80~3.00	2.5~6.0	1.5~3.6
	石膏	2.41~2.58	2.1~4.5	1.3~2.8
变质岩	片麻岩	2.60~3.30	6.0~6.7	3.5~4.0
	大理岩	2.68~2.72	5.8~7.3	3.5~4.7
	石英岩	2.56~2.90	3.0~5.6	2.8~3.2
	片岩	2.68~3.00	5.8~6.4	3.5~4.8
	板岩	2.55~2.66	3.6~4.5	2.1~2.8
	千枚岩	2.71~2.86	2.8~5.2	1.8~3.2
岩浆岩	花岗岩	2.30~2.96	4.5~6.5	2.3~3.8
	闪长岩	2.52~2.70	5.7~6.4	2.8~3.8
	玄武岩	2.53~3.30	4.5~7.5	3.0~4.5
	安山岩	2.30~3.10	4.2~5.6	2.5~3.3
	辉长岩	2.55~2.98	5.3~6.5	3.2~4.0
	辉绿岩	2.53~2.97	5.2~5.8	3.1~3.5
	橄榄岩	2.90~3.10	6.5~8.0	4.0~4.8
	凝灰岩	1.60~1.95	2.6~4.3	1.6~2.6

表 A. 0.3 (续)

类别	名称	密度 ρ (g/cm^3)	纵波速度 V_p (km/s)	横波速度 V_s (km/s)
其他	水	1.00	1.4~1.6	—
	冰	0.80~0.90	3.1~3.6	—
	混凝土	2.40~2.70	2.0~4.5	1.2~2.7

A. 0.4 部分岩石的电磁波衰减系数可参照表 A. 0.4 取值。

表 A. 0.4 部分岩石的电磁波衰减系数参考值

单位: dB/m

岩性	电磁波频率 f				
	$1 \times 10^6 \text{ Hz}$	$3 \times 10^6 \text{ Hz}$	$8 \times 10^6 \text{ Hz}$	$10 \times 10^6 \text{ Hz}$	$37 \times 10^6 \text{ Hz}$
片岩	0.087~0.174	0.261~0.347	—	4.517	—
片麻岩	—	—	—	3.909	—
大理岩	—	0.087~0.174	0.347~0.434	—	—
闪长岩	0.287~0.434	0.565~0.651	—	—	—
石灰岩	0.313	—	0.478	—	0.869
破碎、含水性弱的灰岩	0.608	—	—	—	3.127~5.125
火成岩、花岗岩	—	0.521~0.651	—	—	—

A. 0.5 常见介质的基本电磁参数可参照表 A. 0.5 取值。

表 A. 0.5 常见介质的基本电磁参数参考值

介质	ϵ_r	$\sigma/(\text{nS}/\text{m})$	$V/(\text{cm}/\text{ns})$	$\alpha/(\text{dB}/\text{m})$
空气	1	0	0.3	0
蒸馏水	80	0.004	0.033	0.002
淡水	80	0.5	0.033	0.1

表 A.0.5 (续)

介质	ϵ_r	$\sigma/(ms/m)$	V/(m/ns)	$\alpha/(dB/m)$
海水	80	1000~10000	0.01	1000
干砂	3~6	0.01	0.15	0.01
湿砂	20~30	0.1~1.0	0.06	0.03~0.3
石灰岩	4~8	0.2~2	0.11~0.12	0.4~1
泥岩	5~15	1~100	0.09	1~100
页岩	5~13	10~100	0.09	1~100
泥砂	5~30	1~100	0.07	1~100
黏土	5~40	2~1000	0.06	1~300
花岗岩	4~6	0.01~1	0.12~0.13	0.01~1
岩盐	5~6	0.01~1	0.13	0.01~1
冰	3~4	0.01	0.16	0.01

附录 B 常用公式

B. 0.1 绝对误差应按式 (B. 0.1) 计算:

$$\Delta = |d_{ai} - d'_{ai}| \quad (\text{B. 0.1})$$

式中 Δ —— 绝对误差;

d_{ai} —— 基本观测值, 重复观测时为有效数据的算术平均值;

d'_{ai} —— 系统检查观测值, 重复观测时为有效数据的算术平均值。

B. 0.2 平均绝对误差应按式 (B. 0.2) 计算:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta_i| \quad (\text{B. 0.2})$$

式中 $\bar{\Delta}$ —— 平均绝对误差, %;

Δ_i —— 绝对误差;

N —— 检查点、测点、测线个数。

B. 0.3 相对误差应按式 (B. 0.3) 计算:

$$\delta = 2 \frac{|d_{ai} - d'_{ai}|}{d_{ai} + d'_{ai}} \times 100\% \quad (\text{B. 0.3})$$

式中 δ —— 相对误差, %。

B. 0.4 平均相对误差应按式 (B. 0.4) 计算:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \delta_i \right) \times 100\% \quad (\text{B. 0.4})$$

式中 $\bar{\delta}$ —— 平均相对误差, %。

B. 0.5 均方相对误差应按式 (B. 0.5) 计算:

$$m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i^2} \times 100\% \quad (\text{B. 0.5})$$

式中 m —— 均方相对误差, %。

B. 0.6 总均方相对误差应按式 (B. 0.6) 计算:

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i^2} \times 100\% \quad (\text{B. 0. 6})$$

式中 M —— 总均方相对误差, %。

B. 0.7 极差系数应按式 (B. 0.7) 计算:

$$D_j = \frac{2}{\sqrt{n-1}} \times \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}} \quad (\text{B. 0. 7})$$

式中 D_j —— 极差系数;

d_{\max} —— 参与计算数据中的最大值;

d_{\min} —— 参与计算数据中的最小值;

n —— 参与计算数据的个数。

B. 0.8 直流电阻率法常用公式见式 (B. 0.8-1) ~ 式 (B. 0.8-2)。

相对异常值计算公式:

$$\delta_r = \frac{|d_a - d_b|}{d_b} \times 100\% \quad (\text{B. 0. 8-1})$$

式中 δ_r —— 相对异常值;

d_a —— 观测值;

d_b —— 背景值。

异常顶部埋深估算公式:

$$H = 0.25 \times q \quad (\text{B. 0. 8-2})$$

式中 H —— 异常顶部埋深, m;

q —— 半幅值宽度, m。

B. 0.9 自然电场法异常顶部埋深估算公式见式 (B. 0.9)。

$$H = (0.4 \sim 0.6) \times q \quad (\text{B. 0. 9})$$

式中 H —— 异常顶部埋深, m;

q —— 半幅值宽度, m。

B. 0.10 瞬变电磁法常用公式见式 (B. 0.10-1) ~ 式 (B. 0.10-4)。

扩散深度 δ 估算公式:

$$\delta \approx 0.55 \left(\frac{I \rho S_R}{\eta} \right)^{1/5} \quad (\text{B. 0. 10-1})$$

式中 I ——发射电流, A;
 ρ ——上覆层电阻率, $\Omega \cdot m$;
 S_R ——发射线圈面积, m^2 ;
 η ——最小可分辨电平, nV/m^2 。

观测时间确定公式:

$$t_{\min} \leq (h_{\min})^2 / (\rho_{\max}) \times 10^{-3} \quad (B.0.10-2)$$

$$t_{\max} \geq (h_{\max})^2 / (\rho_{\min}) \times 10^{-3} \quad (B.0.10-3)$$

式中 t_{\min} ——最小延时, s;
 t_{\max} ——最大延时, s;
 h_{\min} ——最小探测深度, m;
 h_{\max} ——最大探测深度, m;
 ρ_{\max}, ρ_{\min} ——测区介质最高及最低电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

关断时间评估经验公式:

$$t_{\text{off}} = \frac{2 \times L^{1.25}}{5 + R} \quad (B.0.10-4)$$

式中 t_{off} ——关断时间, μs ;
 L ——回线边长, m;
 R ——回线电阻, Ω 。

B.0.11 瑞雷波速度和横波速度转换公式见式 (B.0.11)。

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12v}{1 + \mu_d} V_s \quad (B.0.11)$$

式中 V_R ——瑞雷波速度, m/s ;
 V_s ——横波速度, m/s ;
 μ_d ——泊松比。

B.0.12 同位素示踪法渗透系数计算公式见式 (B.0.12-1) ~ 式 (B.0.12-3)。

$$K = \frac{V_t}{J} \quad (B.0.12-1)$$

$$V_t = \frac{\pi(r^2 - r_o^2)}{2art} \ln \frac{N_o - N_b}{N_t - N_b} \quad (B.0.12-2)$$

$$V_v = L / \Delta T \quad (\text{B. 0. 12 - 3})$$

式中 K ——渗透系数, m/d;
 J ——测试孔附近的地下水水力坡度;
 V_t ——水平流速, m/d;
 r ——测试孔滤水管内半径, m;
 r_0 ——探头半径, m;
 t ——示踪剂浓度从 N_0 变化到 N_1 所需的时间, d;
 N_0 ——同位素在孔中的初始浓度计数率;
 N_b ——孔中的计数率本底值;
 N_t ——同位素 t 时刻浓度计数率;
 α ——流场畸变校正系数;
 V_v ——垂向流速, m/d;
 ΔT ——探头计数率时间曲线峰值间的时间。

标准用词说明

标准用词	严 格 程 度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应、不得	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做

标准历次版本编写者信息

SL 436—2008

本标准主编单位：水利部黄河水利委员会黄河水利科学研究院

本标准参编单位：水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心

中国水利水电科学研究院

黄河物探研究院（河南）有限公司

山东黄河河务局

中水北方勘测设计研究有限责任公司

中南大学

水利部长江水利委员会长江勘测规划设计研究院

河海大学

水利部水利水电规划设计总院

水利部大坝安全管理中心

湖南继善高科技有限公司

本标准主要起草人：冷元宝 朱文仲 廖义伟 束庆鹏

高航 张震夏 谢向文 刘建伟

刘康和 朱自强 王锐 才致轩

汤井田 常晓辉 刘建刚 郭玉松

乔惠忠 周杨 李长征 张建中

王清玉 蔡加兴 胡伟华 杨正华

姚成林 赵志忠

中华人民共和国水利行业标准

堤防隐患探测规程

SL/T 436—2023

条 文 说 明

目 次

1 总则.....	63
3 基本规定.....	64
4 电法.....	67
5 电磁法.....	69
6 探地雷达法.....	70
7 拟流场法.....	72
8 弹性波法.....	73
9 水下探测方法.....	74
10 温度场法	77
11 同位素示踪法	78

1 总 则

1.0.2 本规程中的堤防包括各类江、河、湖、海堤防。

3 基本规定

3.1 探测对象、方法及要求

3.1.2 各探测方法的适用范围可参考表1。

表1 探测方法适用范围汇总表

方法	适用范围
自然电场法	堤防集中渗流、管涌通道；确定渗漏进口位置及流向
直流电阻率法	堤身及堤基的洞穴、裂缝、松散体、砂层及渗漏区域等与周围介质存在电性差异的隐患。跨孔电阻率成像、三维电阻率成像还可用于穿堤建筑物土石接合部的隐患探测；时移电阻率成像可用于堤防的连续监测
激发极化法	渗漏区域
瞬变电磁法	渗漏通道、松散体、砂层等
磁电阻率法	渗漏通道
探地雷达法	洞穴、松散体、砂层、裂缝、软夹层、故河道、老口门、渗漏通道、护坡、衬砌或闸室底板脱空等与周边介质存在明显介电常数差异的隐患
拟流场法	干渗漏、管涌进水口位置
弹性波反射波法	松散体、洞穴、高含砂层、护坡或闸室底板脱空等与周边介质存在弹性波速差异的隐患
弹性波折射波法	测定堤防堤身和堤基介质的纵、横波速度，判定堤防填筑介质的密实度
瑞雷波法	堤防松散体、洞穴、护坡或闸室底板脱空及堤身或堤基密实度评价；测定堤防介质的动弹性力学参数并对饱和砂土液化进行判定
水下摄像法	水下建筑物缺陷、水下阻塞、堆积、沉积物分布
声呐法	水下建筑物缺陷、水下阻塞、堆积、沉积物分布
示踪法	水下结构附近水体的流速、流向等

表 1 (续)

方法	适用范围
声学多普勒流速剖面仪(ADCP)法	水体的流速、流向等
水下浅地层探测方法	堤岸防护工程水下基础缺陷
温度场法	渗漏通道出口、背水堤坡散浸部位位置
同位素示踪法	水平流速和流向、垂向流速和流向、地层渗透系数、孔间平均流速、平均孔隙度、计算地层弥散系数等
钻孔全景光学成像	钻孔中观测土层岩性、结构和地质分层；观测孔壁洞穴、软弱夹层、裂隙发育、破碎等隐患分布；判定裂缝等的倾向、倾角等产状要素及裂缝分布密度、闭合程度等
锥探法	堤身缺陷探测和堤岸防护工程水下根石探测

探测方法选择需综合考虑地质和地球物理条件、工程条件、场地条件、环境条件，保证探测方法有效、外业工作安全。

3.1.3 普查一般选择工作效率高、成果解释快速的方法开展，如探地雷达法、高密度电阻率法、拟流场法；在防汛抢险等要求快速探测的任务中，可以采用普查方法进行快速探测。详查是指在普查工作的基础上，通过加密测线、测点进行精细探测，或者选择两种或以上有互补作用的方法进行综合探测，因此普查方法也可用于详查工作。

3.2 外业工作

3.2.5 测量设备可使用卷尺、测距轮、激光测距仪、GPS、全站仪等。

3.2.6 探测记录一般包括日期、探测方法、仪器、人员、探测堤段桩号范围、备注等内容。

3.3 资料解释与验证

3.3.4 堤防分类可参考以下原则：未发现隐患段指堤身土质优良、均匀、未发现隐患的堤段；隐患相对发育段指堤身土中含沙

量较高但未成层，或者土质整体均匀性稍差的堤段；凡发现洞穴、裂缝、松散体、高含砂层等隐患的堤段，均从隐患边缘向外推 10m，定为隐患发育段，当两个隐患发育段之间的距离小于 10m 时，需予合并，视为一个隐患发育段。

4 电 法

4.1 自然电场法

4.1.1 自然电场法适合查找渗漏通道入口、测定地下渗漏水流的流向。由于自然电位异常值幅度较小、易受干扰，探测区域内如果存在较强的干扰源，则不能使用该方法。

4.1.4 电位观测法是将 N 电极固定不动，作为相对电位零点，用 M 电极沿测线逐点观测每一测点与相对电位零点之间的电位差，得出整个测线的电位曲线，实际应用中一般采用零点法；梯度法是使 M 电极在前、N 电极在后，两个电极同步平行移动，沿测线顺序测量相邻两点间的电位差，得出整个测线的电位曲线。

4.1.5 背景值可根据实测的视电阻率数值，采用数理统计方法确定。

4.2 直流电阻率法

4.2.1 电剖面法包括对称四极剖面法、联合剖面法和中间梯度法等。

4.2.2 电剖面法、电测深法的设备和配件相对高密度电阻率法设备较轻便，但自动化程度低，探测过程需要人工移动电极。电剖面法和电测深法成果曲线只能反映沿测线水平方向或某一测点深度方向上的异常变化。

高密度电阻率法的电极系一次布设，可完成整个断面上的数据采集，自动化程度高，数据密度大；但设备相对笨重，电极布设耗时，完成同样长度测线探测的时间要长于电剖面法。

三维电阻率成像方法可在同样的电极距下获得更大的探测深度，适合土石结合部等空间有限、不利于测线展开的探测环境。

时移电阻率成像通过专用的反演算法，能够突出探测区域内

随时间变化的异常部位，一定程度上克服背景场复杂造成的资料解释困难，适宜对重点部位，如渗漏易发地段的连续监测。

受体积效应影响，直流电阻率法这类传导类电法对深部异常的分辨力一般低于探地雷达法、弹性波反射法等方法。

5 电 磁 法

5.1 瞬变电磁法

5.1.1 瞬变电磁法探测深度较深，仪器设备较轻便，对场地要求较低，其横向分辨率高，适宜与对深部隐患和渗漏部位的水平定位，但在浅部区域存在一定的探测盲区。

5.1.4 在环境复杂或噪声地区实际的探测深度可能远小于一个扩散深度。

5.2 磁 电 阻 率 法

5.2.1 磁电阻率法利用人工场源探测渗漏通道，其抗干扰性要优于自然电场法，但无法测定地下水的流向。

6 探地雷达法

6.0.1 探地雷达法设备集成度高、工作效率高，是对地下目标较为精确、高效的探测方法。可广泛用于普查、详查和应急抢险条件下的快速探测工作。高电导率屏蔽层会影响对其下异常体的探测效果，高压线、大体积金属体等也会给探测工作造成干扰。

6.0.2 剖面法是将发射天线和接收天线以固定间距沿测线同步移动的一种测量方式；透射法是将发射天线和接收天线分别置于待测对象的两侧，同步移动两天线进行测量的一种方式；宽角法是固定发射（或接收）天线，使接收（或发射）天线沿测线移动而不断改变两个天线之间的距离（增大或减小）进行测量的一种方式；共中心点法是在保证发射和接收两天线中心点位置不动的情况下，不断改变两个天线之间的距离（增大或减小）进行测量的一种方式。后两种方法主要用于求取地表以下介质的电磁波传播速度。钻孔雷达分单孔探测和跨孔探测，而单孔探测基于孔中收发一体的雷达天线，其接收的雷达数据是钻孔 360°方向的雷达数据，单孔的雷达数据无法定位反射体的方位，要克服这一缺点的办法就是采用多孔测量进行综合解释，即利用两孔或三角形异常交汇进行方位确定。三维雷达天线是采用多组阵列天线同时探测，一次采集一个面域数据的探测方法，目前三维雷达探测主要是高频屏蔽天线。

6.0.3 应用探地雷达探测隐患要求被探测的隐患与周围介质之间具有介电常数差异，其差异越大，探测效果越好。

6.0.4 本条规定仅为用于堤防隐患探测的探地雷达仪器应满足基本性能指标。目前，不同厂家的探地雷达系统原理、效果、数据处理方法均很相似，仪器的主要技术指标既有共性，也有各自的特点，可根据实际工作效果合理选用。

6.0.5 本条规定了探地雷达工作的基本要求。实际探测时，要合理选择工作模式、天线种类、测线布置。记录时窗长度推荐数值考虑了介质速度与探测深度的变化情况。

7 拟流场法

7.0.1 拟流场法主要用于渗漏、管涌通道水下进口的快速定位。工作时需要非金属材质的船只配合。当渗漏通道进口不集中，渗漏量较小时，探测效果较差。

7.0.5 确定平面剖面图的纵坐标比例尺时，宜保证曲线基本居于图幅中间；背景值相差不大的堤段保持相同的范围和比例；能够充分突出异常。

8 弹性 波 法

8.1 反 射 波 法

8.1.1 与基于电磁波运动学原理的探地雷达法相比，弹性波反射波法对深部隐患探测效果较好，且不受高压线、金属体及高电导率屏蔽层的影响；弹性波反射波法的分辨率一般也要优于电阻率法等传导类方法。

8.1.4 数字地震仪包括集中式和分布式 2 大类，无线分布式地震仪采用无线连接的采集单元和检波器，有利于提高外业工作效率，降低劳动强度。

8.2 折 射 波 法

8.2.1 弹性波折射波法主要用于测定堤防各填筑层和天然地层的弹性波速度，利用测定的纵波速度和横波速度，还可以计算相应的动弹性力学参数。

8.3 瑞 雷 波 法

8.3.1 瑞雷波法基于面波的频散效应探测异常体，其对异常体体积、形状的要求相较反射波法要求较高。

9 水下探测方法

9.1 水下结构探测方法

9.1.1 水下结构探测方法主要按照使用的探测仪器进行分类，声呐法可根据工作任务选择侧扫声呐、多波束声呐、二维图像声呐、三维成像声呐、三维实时声呐等类型的声呐设备。探测方法选择可参考表 2。

表 2 水下结构探测项目和方法对照表

探测项目	探测方法与设备
小范围、建筑物局部缺陷检测	水质较清时，宜采用水下摄像法；水质混浊时，宜采用二维或三维成像声呐
大面积的水下建筑物缺陷检测	普查：多波束声呐、侧扫声呐、三维实时声呐；详查：对重点部位或发现异常部位采用水下摄像或二维、三维成像声呐、三维实时声呐详查
闸门、门槽等水下建筑检测	水质较清时，宜采用水下机器人作为载体，或由潜水员手持水下高清摄像头进行检查；水质较混时，宜采用水下机器人搭载成像声呐进行检查；场地条件允许时，可采用三维成像声呐进行整体扫描普查，再采用水下机器人搭载水下摄像头或成像声呐进行局部详细检查
岸坡、渠道等水下构筑物检测	宜采用多波束声呐、侧扫声呐、三维实时声呐方法进行面积性扫描普查，再针对重点部位和检测异常部位进行水下摄像或声呐进行详细检测
水下阻塞、堆积、沉积物检测	宜采用多波束声呐、侧扫声呐、三维实时声呐方法
水下结构渗漏探测和河道及水下结构中水体的流速流向检测	可采用示踪法、ADCP 法

9.1.2 水下结构探测的主要项目可参考表 3 进行选择。

表 3 水下结构探测主要项目汇总表

探测对象类型	探 测 项 目
岸堤缺陷	坍塌、护石缺失、护石被损、水下冲刷等
裂缝	分布、数量、走向、长度、宽度及裂缝变化情况
混凝土损伤	外观缺陷、冻胀、冻融、剥蚀、脱落及冲刷、附着物等
金属结构缺陷	锈蚀、腐蚀、碱损、附着物等
渗漏状态	点、线或面渗漏情况
水下建筑物形态 结构、状态	水下构筑物的外观尺寸、表面附着物、淤积物、平整度以及表面磨蚀、空洞情况、水下冲刷及淤积

9.1.3 二维、三维成像声呐的载体一般采用水下机器人或支架；多波束声呐、侧扫声呐、三维实时声呐、ADCP 的载体一般采用有人或无人测量船；水下摄像可以由潜水员手持拍摄，也有以水下机器人为载体进行拍摄。

9.1.5 水下摄像的重点区域是指普查发现的异常区域、涉及安全的重点工程结构部位、可能发生破损的怀疑区域等。为保证测线覆盖面积，需设置合适的水下摄像仪器开角，并考虑实际的水下能见度。

采用坐点扫描方式需要根据扫描对象合理选择坐点位置；采用水下机器人动态连续扫描时，需根据现场条件合理规划水下机器人行进路线。

9.1.6 水下摄像的检查工作一般包括密封性、通电性能、操作功能等；准备工作一般包括辅助设施的搭建、干扰物清理、照明系统调试等。水下定位设备一般采用惯性导航定位系统、水声定位系统，也可根据检查局部的特征点，根据深度传感器、图像声呐数据等进行定位。

二维图像声呐开展管道类型的构筑物检测时，采用 360° 扫描功能的探头有利于提高工作效率。现场检查一般根据探测范围

和精度要求选择合适频率的探头。扫描过程中需注意监测仪器工作状态，发现异常部位时应进行重复扫描。

三维成像声呐探测可选择固定工作方式或水下机器人搭载的工作方式，采用固定工作方式时，要保持支架稳定，防止探头因水流等出现抖动。

9.1.7 水下摄像图像缺陷判断的指标主要包括异常的几何形状、色彩差异、影纹粗细等特征；图像增强主要是在水下能见度不足等条件造成探测成果清晰度较差时进行。

9.2 水下浅地层探测方法

9.2.3 分体式探头间距过大时，校正的方法和目的主要是动校正消除速度误差。

9.2.4 单位距离内的采样点数根据目标体尺寸确定。

水底地层的波速特征分析方法包括跨孔声波测量、多道水上地震测量、与已知深度目标体走时信号对比标定等。

定位方式一般采用全球定位系统进行实时定位，同步记录水平位置及高程信息。

10 温 度 场 法

10.0.1 温度场法主要适用于堤防的日常巡查和防汛抢险时出渗区域的快速定位；由于温度场法的探测结果易受水体温度、气温、日照条件和植被的影响，且探测结果的定量分析难度较大，一般仅用于堤防普查工作。

11 同位素示踪法

11.0.1 同位素示踪法需结合钻孔，对地下水的流速、流向、涌水量等参数进行测定。

常用的同位素示踪剂包括³⁵Br、¹³¹I、¹⁹⁷Au等。³⁵Br 常用于就地测试，在水中以大于 3 个数量级的最大允许浓度提供灵敏的探测，可持续数天。采用单孔示踪法测试渗透水流向时可采用¹³¹I 和¹⁹⁷Au，采用单井稀释法测定渗透流速时可采用¹³¹I 和³⁵Br。¹⁹⁷Au一般作为标记颗粒介质的示踪剂选入水文地质研究，在地下水研究中要考虑吸附问题。¹³¹I 的半衰期适合于 2 个月的现场研究，为避免受有机物质吸附的影响，使用中要采取减少吸附的措施。

11.0.6 实际工作中，需注意注重测量资料与地质实际情况对比，使之更能切合实际反映堤防隐患的真实情况。

利用“能量测量方法”，在天然流场下的单井中测量出水平流速 V_1 沿高程的分布曲线，划分出含水层与隔水层的位置分布，利用峰—峰测量方法，在单井中测量出隔水层顶底板处的垂向流速的大小和方向，根据垂向流速测量结果，计算出含水层的涌水量 ($+Q$) 或吸水量 ($-Q$)，再配合含水层水平流速的测量数值，利用“达西定律”和“立方定律”求解出各含水层的静水头高度（涌水为正水头；吸水为负水头），计算公式见式（1）。

$$\pm \delta h = \frac{Q}{2\pi r V_1} \quad (1)$$

式中 V_1 —— 地下水水平流速。

地下水渗透系数计算公式见式（2）。

$$K = V_1 / J \quad (2)$$

式中 K —— 渗透系数；

J —— 地下水的水力梯度。

导水系数计算公式见式(3)。

$$T = KM \quad (3)$$

式中 T ——导水系数；
 M ——含水层厚度。