

ICS
CCS

CWEC

中国水利企业协会团体标准

T/CWEC XXX-XXXX

堤防隐患探地雷达与瞬变电磁雷达组合探测规程

Technical Code for Combined Detection of Levee Hidden Dangers Using Ground
Penetrating Radar and Transient Electromagnetic Radar

(征求意见稿)

(2026.10.20)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国水利企业协会 发布

目录

前 言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
3.1 术语	1
3.2 符号	2
4 基本规定	3
4.1 应用对象	3
4.2 使用条件	3
4.3 工作装置	3
4.4 工作流程	5
5 探测系统	5
5.1 一般规定	5
5.2 探地雷达	6
5.3 瞬变电磁雷达	6
5.4 高精度定位设备	7
5.5 高分辨摄像机	7
5.6 移动平台及辅助设备	8
5.7 综合数据处理平台	8
6 方案设计	8
6.1 工作任务	8
6.2 资料收集	9
6.3 踏勘	9
6.4 方法有效性分析	9
6.5 方法试验	9
6.6 工作参数选择	10
6.7 工作精度要求	13
6.8 方案编写	13
7 探测	14
7.1 一般规定	14
7.2 探测准备工作	15
7.3 数据采集	15
7.4 数据处理	16
7.5 资料解释与验证	16
7.6 质量检查与评价	19
8 成果	20
8.1 一般规定	20
8.2 雷达数据解译结果	20

8.3 堤防隐患位置信息 20

8.4 异常点定位与验证 20

8.5 堤防隐患成因分析及处置建议 20

8.6 探测报告编写 21

9 堤防隐患信息管理 22

9.1 一般规定 22

9.2 建立隐患数据库 22

9.3 隐患信息管理系统 23

附录 A （规范性附录）堤防常见介质的物理参数表 25

附录 B （规范性附录）堤防隐患探测表 26

附录 C （资料性附录）典型探地雷达波谱 28

C.1 正常堤防雷达波谱 28

C.2 地下管道雷达波谱 28

C.3 地下设施雷达波谱 29

C.4 堤防隐患雷达波谱 31

附录 D（资料性附录）典型视电阻率断面图 33

D.1 地下管线视电阻率断面图 33

D.2 地下设施视电阻率断面图 34

D.3 隐患视电阻率断面图 35

参考文献 37

前 言

本文件按照 GB/T1.1—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。

本文件由中国水利企业协会提出并归口。

本文件起草单位：中国水利水电科学研究院、北京国电经纬工程技术股份有限公司、中国南水北调集团水网智慧科技有限公司、山东智洋上水信息技术有限公司、中水北方勘测设计研究有限责任公司、中水东北勘测设计研究有限责任公司、中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司、北京中水润科认证有限责任公司

本文件主要起草人：钱 峰、吴泽斌、王 帆、阮跃东、张大伟、鲁明达、方 坤、李世浩、刘 琴、宋文龙、柴福鑫、穆 杰、刘行刚、盖红星、沈乃政、王志豪、王玮琦、林文青、祁 昕、毕吴瑕、张延逸、侯伟亚、李永铭、李国瑞、王春阳、侯召成、郑 钧、严 俊、刘 顺、王 伟、谭 珂、赵京利、田艳哲、刘占兴、杨 冶、宋伟健、陈 鑫

堤防隐患探地雷达与瞬变电磁雷达组合探测规程

1 范围

本标准规定了应用探地雷达与瞬变电磁组合雷达进行堤防隐患探测的方案设计、工作方法、数据采集、资料处理与解译、质量评价及报告编写等技术要求。

本标准适用于江河湖海堤防应用探地雷达与瞬变电磁组合雷达进行隐患探测,探测各类目标体的深度在 20m 以内。在工作中除应符合本技术规程外,尚应符合国家、行业现行有关标准的规定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用必不可少。凡是注日期的引用文件,仅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 50286 堤防工程设计规范

SL/T 79-1 堤防工程安全监测技术规程

SL 188 堤防工程地质勘察规范

SL/T 291.1 水利水电工程勘探规程 第 1 部分:物探

SL 436 堤防隐患探测规程

SL 713 水工混凝土结构缺陷检测技术规程

SL 734 水利工程质量检测技术规范

NB/T 10133 水电工程探地雷达检测技术规程

DB33/T 852 海塘工程安全评价导则

3 术语和符号

3.1 术语

3.1.1 堤防隐患 Hidden danger of levee

指堤防内部或外部在结构、材料、地基等方面存在的安全隐患,包括但不限于洞穴、裂缝、松软层(含松软堤段与堤基)、高含砂层(含砂质堤段)、护坡脱空区、砂砾石层,以及渗漏、管涌等现象。

3.1.2 探地雷达 Ground Penetrating Radar

一种通过主机发射、接收高频短脉冲电磁波,利用地下不同介质介电常数差异成像的浅层无损探测设备;堤防探测常用屏蔽天线,可通过连续剖面测量、点测方式识别堤身脱空、洞穴、裂缝、分层等浅层隐患,不同中心频率天线对应不同探测深度与分辨率。

3.1.3 瞬变电磁雷达 Transient Electromagnetic Radar, TER

一种使用调制的双极性波及定向天线向地下空间发射脉冲电磁波,并在脉冲间歇期间搜索探测区域内目标体回波,以提取目标距离、速度、角度及其他识别特征的探测设备,可采集信息,并绘制视电阻率断面图。

3.1.4 组合雷达 Combined Radar

将探地雷达(浅层高分辨率成像)与瞬变电磁雷达(中深层电性勘探)硬件同步集成、数据时间坐

标配准融合的综合堤防隐患探测方法，同步获取地下介质介电成像与视电阻率断面，实现深浅层隐患互补识别。

3.1.5 三维探地雷达探测 3D Ground Penetrating Radar Survey

指采用多通道阵列天线对观测面进行高密度同步采集，并通过定位校正、三维数据处理与成像，获取介质内部三维空间分布特征的探测方法。

3.1.6 连续测量 Continuous Profiling

指天线在移动过程中实施连续数据采集的剖面探测方式。

3.1.7 点测 Point Sounding

指天线依次在各测点处保持静止状态实施数据采集的探测方式。

3.1.8 相对介电常数 Relative Permittivity

指介质的介电常数与真空介电常数的比值。

3.1.9 视电阻率 Apparent Resistivity

在地下介质非均匀条件下，将实测电磁响应代入均匀介质理论公式反算得到的电阻率等效值，其数值受地下介质真电阻率、地质体几何形态及装置观测参数共同影响。

3.1.10 动态范围 Dynamic Range

指雷达系统能够同时处理的最大信号与最小信号（或噪声水平）之间的比值。

3.1.11 可控时窗 Controllable Time Window

可控时窗是探地雷达用户通过设定时窗长度，精确控制雷达系统监听地下回波的时间，从而实现对特定深度区域的精准探测。

3.1.12 异常区域 Anomaly Zone

在探地雷达、瞬变电磁雷达断面图中，介电常数、视电阻率存在显著差异并能清晰显示的目标体（或地质体）。

3.1.13 雷达反射同相轴 Radar reflection event

探地雷达剖面中同一地下反射界面形成的连续波形曲线，是识别堤身分层、隐患界面的核心解译标识。

3.1.14 雷达绕射波 Radar diffracted wave

地下洞穴、裂缝、管线等点状/条状异常体边界产生的散射电磁波，在雷达剖面呈现典型双曲线波形，为堤防小型隐患识别特征。

3.2 符号

f_c —天线中心频率，MHz；

ΔL —非均匀体尺寸，m；

D—探测深度，m；

x —空间分辨率，m；

ε_r —相对介电常数。

Tx—发射系统或发射回线；

Rx—接收系统或接收回线；

L—发射回线边长，m；

I—发射电流强度，A；

V—接收线圈的感应电压， μV ；

B—磁感应强度，nT，T；

ρ_r —视电阻率， $\Omega \cdot m$ 。

4 基本规定

4.1 应用对象

组合雷达适用于堤防隐患的普查与详查工作。其中，探地雷达适用于探测洞穴、松散体、砂层、护坡或闸室底板脱空以及其他与堤身填筑材料存在介电常数差异的异常体；瞬变电磁雷达适用于探测渗漏通道、松散体、砂层等隐患。

4.2 使用条件

4.2.1 探测工作应避免在路面有超过 1cm 深的积水或积雪时进行，探测环境温度应在 -20°C 至 50°C 之间。

4.2.2 隐患体与周边介质之间，探地雷达探测需具备明显相对介电常数差异，瞬变电磁雷达探测需具备明显电性差异；两类物性参数参考附录 A 表 A.1。

4.2.3 表层不宜存在低阻屏蔽层，探测区域内宜无大范围金属体或无线电发射源等强人工电磁干扰，且电磁环境噪声及人文活动影响宜较小。

4.2.4 探测目标体的深度及规模应在组合雷达的探测深度范围内，深度一般不宜超过 20 米，且目标体深度与其特征尺寸（直径）之比不宜大于 10。

4.2.5 探测范围主要针对堤顶及堤身，其他区域可参照执行。

4.3 工作装置

4.3.1 探地雷达可选用剖面法、透射法、宽角法或共中心点法等测量方式。

（1）剖面法：指发射天线与接收天线以固定间距沿测线同步移动的测量方式。

（2）透射法：指将发射天线与接收天线分别置于被测对象两侧，并同步移动进行测量的方式。

（3）宽角法：指固定发射（或接收）天线，使接收（或发射）天线沿测线同步移动，并连续改变两天线间距进行测量的方式。

（4）共中心点法：指在确保发射与接收天线中心点位置固定不变的条件下，连续改变两天线间距进行测量的方式。

4.3.2 瞬变电磁雷达可采用重叠回线、中心回线、偶极线框、大定源回线等装置形式。

（1）重叠回线装置：采用 Rx 线圈观测感应电压 V 或 dBz/dt ，装置示意如图 1 所示。

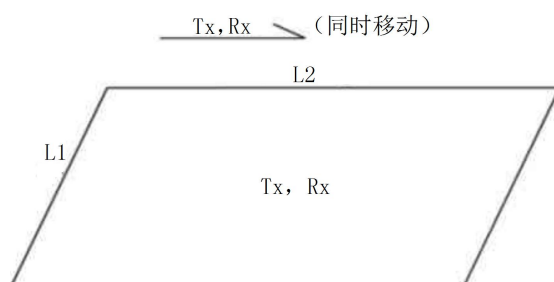


图1 重叠回线装置示意图

(2) 中心回线装置：采用 R_x 线圈观测感应电压 V 或 dB_z/dt ，亦可观测 dB_z/dt 、 dB_y/dt 、 dB_x/dt 三个分量，装置示意如图2所示。

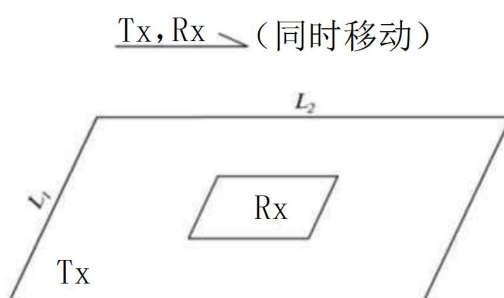


图2 中心回线装置示意图

(3) 偶极线框装置：采用 R_x 线圈观测的目标是感应电压 V 或磁场变化率 dB_z/dt ，详见图3。

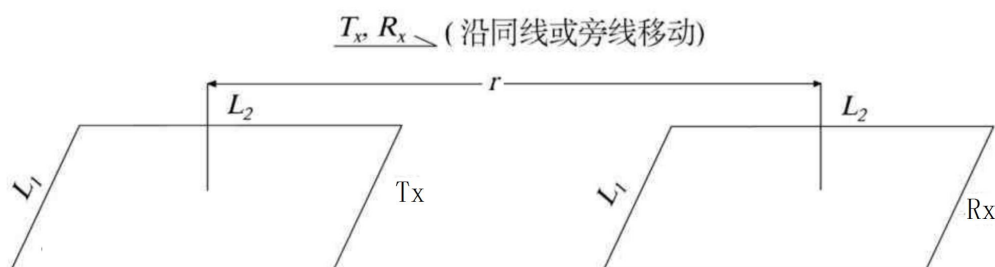


图3 偶极装置示意图

(4) 大定源回线：使用 R_x 探头或线圈观测感应电压 V 或磁场变化率 dB_z/dt 、 dB_y/dt 、 dB_x/dt 中的一个至三个分量。常用的定源回线工作装置见图4与图5。

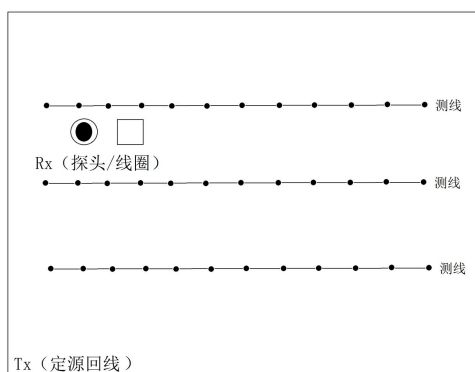


图4 定源回线框内法布置示意图

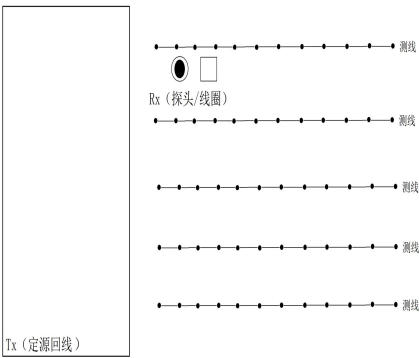


图 5 定源回线框外法布置示意图

4.3.3 组合雷达单测线装置：探地雷达统一采用剖面连续测量法，匹配移动平台匀速采集需求；瞬变电磁雷达宜采用重叠回线或中心回线。

4.3.4 组合雷达三维装置：多通道阵列探地雷达采用连续剖面扫描，相邻测带搭接宽度满足 7.1.5 要求；多通道瞬变电磁雷达宜采用中心回线。

4.4 工作流程

探测工作宜遵循以下程序：接受任务、搜集资料、现场踏勘、制定探测方案、数据采集、数据解译、复测、成果验证、报告编写、成果校审与提交。具体流程见图 6。

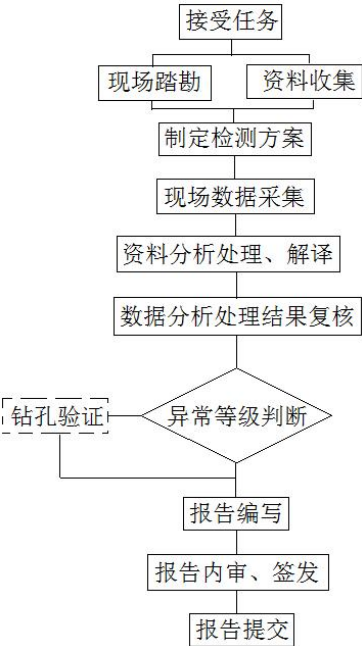


图 6 探地雷达与瞬变电磁雷达组合探测流程

5 探测系统

5.1 一般规定

5.1.1 组合雷达系统应包括硬件设备与软件系统。硬件设备由探地雷达、瞬变电磁雷达、高精度定位设备、高分辨率摄像机、移动平台及辅助设备构成。软件系统由现场编辑、数据采集、数据处理、视图与解译等功能模块构成。组合探测硬件集成方式宜将探地雷达、瞬变电磁雷达、高精度定位设备、高分辨率摄像机统一搭载于移动平台，由同步控制系统统一触发采集，探地雷达回波数据、定位坐标、影

像数据时间戳一一匹配后同步上传至综合数据中心。

5.1.2 三维探地雷达探测须采用屏蔽阵列天线；同一测网全程使用同一中心频率天线，增益、叠加次数、时窗、采样间隔等采集参数全程保持一致，不可中途变更。

5.1.3 所有仪器设备宜指定专人负责，并严格按照操作手册进行使用、维护与管理。

5.1.4 仪器设备应存放于阴凉、通风、干燥、无腐蚀性气体且无强磁场的场所。其使用与运输均须确保处于安全状态。

5.1.5 项目开工前与收工后，应对所有仪器设备进行全面检查、维护与校准。

5.1.6 在非工作期间，所有仪器设备应每月进行一次通电检查，仪器电池应依据说明书要求定期充电。

5.1.7 仪器校验周期不宜超过一年。仪器主机的主要部件维修后，应记录处理情况并重新进行校验。

5.2 探地雷达

5.2.1 根据探测任务合理选用仪器。探地雷达系统应包括探测设备与数据分析软件。

5.2.2 探测设备包括：雷达主机、天线及附件。

5.2.3 数据分析软件应具备数据采集、数据处理、数据解译及成果展示等功能模块。

5.2.4 多通道探地雷达应配备不同频率的天线，以满足不同探测深度的要求。天线中心频率的选择应参照表 1 的规定。

表 1 理论最大有效探测深度与探地雷达天线中心频率对应关系

最大有效探测深度H（m）	天线中心频率（MHz）
1.0	>500
1.0~2.0	200~500
2.0~5.0	100~200
5.0~8.0	≤100

5.2.5 探地雷达系统性能应满足以下要求：

- （1）动态范围不宜小于 150dB；
- （2）数据采集记录位数不小于 16bit；
- （3）可控时窗为 0ns 至 3000ns；
- （4）信噪比应大于或等于 70dB；
- （5）系统中心频率范围为 16MHz 至 1500MHz；
- （6）脉冲重复频率为 3kHz 至 100kHz；
- （7）最小采样间隔不应大于 0.05ns；
- （8）点测时应具备多次迭加功能，迭加次数不少于 30 次；
- （9）应具备自动与手动增益调节功能，增益点数应大于 3 个。

5.2.6 探地雷达屏蔽天线应满足以下要求：

堤防隐患探测所用探地雷达天线均应采用全屏蔽结构；临电力线、金属构筑物、穿堤钢管道等强电磁干扰区域，应使用双层屏蔽天线，降低外部噪声对反射波形的干扰。

5.3 瞬变电磁雷达

5.3.1 根据探测任务合理选用仪器。瞬变电磁雷达探测系统应包括探测设备与系统软件。

5.3.2 探测设备包括：发射-接收一体主机、天线（发射与接收回线）及附件。

5.3.3 系统软件应包括现场编辑模块以及数据采集、数据处理、数据解译、成果展示等功能模块。

5.3.4 瞬变电磁雷达应配备不同尺寸、不同工作装置的天线，以满足不同探测深度的要求。天线的

选择参照表 2 的规定。

表 2 最大深度 H 与天线边长 L 的对应关系

最大探测深度H (m)	方形边长L (m) × L (m)
5.0	1m × 1m
7.5	1.5m × 1.5m
10.0	2m × 2m
15.0	3m × 3m
20.0	4m × 4m

注：圆形天线探测深度 H 可按方形天线面积同比例计算。

5.3.5 瞬变电磁雷达系统的技术参数应符合下列规定：

- (1) 动态范围应不低于 120dB；
- (2) 探测时窗宜为 0~80ms；
- (3) A/D 分辨率应为 24 位高精度，接收机分辨率优于 2 μ V；
- (4) 发射机关断时间应小于 100 μ s；
- (5) 采样通道数量应大于 100 道；
- (6) 最大发射电流应大于 50A；
- (7) 各通道的幅频特性与相频特性应保持一致，偏差不应超过 5%；
- (8) 进行点测时，应支持多次叠加，叠加次数不应少于 30 次；
- (9) 探测速度不宜超过 20Km/h；
- (10) 配置天线应具有抗干扰屏蔽功能。

5.4 高精度定位设备

5.4.1 高精度定位设备应能够在堤防隐患探测过程中，为探测系统提供快速、实时的定位服务，输出目标的空间坐标及运动轨迹。

5.4.2 高精度定位设备应具备以下功能：

- (1) 实现定位设备与探测设备之间的关联；
- (2) 通过获取定位设备的端口、波特率、数据位长度、停止位、奇偶校验等参数，将地理信息系统连接至选定设备，并对数据的管理与可视化显示；
- (3) 在雷达探测过程中，定位设备同步记录每个探测点的 X、Y、Z 空间坐标，并将该信息导入地理信息图形显示系统，为探测工作提供定位与导航，同时实时显示工作进展；
- (4) 定位设备应能显示探测点轨迹线，并可读取异常点的坐标信息。

5.4.3 定位设备应符合下列技术要求：

- (1) 应根据测量精度与平台移动速度选定相应的定位设备；
- (2) 定位数据平面精度应小于或等于 10cm，测距误差应小于或等于 0.1%；
- (3) 定位数据高程精度应小于或等于 30cm；
- (4) 数据采样间隔应小于或等于 0.2%。

5.5 高分辨摄像机

5.5.1 摄像设备应与探地雷达、瞬变电磁雷达、高精度定位设备同步触发采集，影像帧时间戳与探地雷达单道波形、测点坐标同步匹配，用于后期雷达异常影像现场溯源。

5.5.2 高分辨率摄像机宜在移动平台两侧及后方至少三个方向进行安装，并满足以下规定：

- (1) 图像帧率应不低于每秒 25 帧；

- (2) 适用检测速度范围宜为 0~100km/h;
- (3) 目标定位精度不应大于 1m;
- (4) 设备防护等级宜达到 IP65。

5.6 移动平台及辅助设备

5.6.1 应根据所搭载的探地雷达、瞬变电磁雷达、高精度定位设备及高分辨率摄像设备的需求, 结合堤防类型选择合适的移动平台。

- (1) 平台移动速度不宜超过 20km/h, 垂向承载能力应大于 50Kg, 横向牵引力应大于 50Kg;
- (2) 宜配备激光雷达模块, 具备自动避障功能;
- (3) 宜具备遥控功能, 或可通过计算机软件、手机应用程序规划巡检路线;
- (4) 宜配备用于安装探地雷达、瞬变电磁雷达主机及供电电池的专用机架或箱体。

5.6.2 同步控制系统由距离编码器触发, 可独立设置探地雷达、瞬变电磁雷达采集触发间隔; 移动平台匀速行进时, 探地雷达横向采样点距应稳定符合设计值, 保证雷达剖面图像横向尺度无拉伸变形。

5.7 综合数据处理平台

5.7.1 综合数据处理平台应具备充足的运算能力, 用于处理和分析探测系统获取的多源数据。系统软件应包含现场编辑、数据采集、数据处理、数据解译及成果展示等功能模块。

5.7.2 现场编辑模块宜包含工区信息、现场环境信息、所选雷达的发射与接收参数以及天线配置信息等内容。

5.7.3 数据采集模块应能对探测系统及现场作业平台进行实时监测与控制, 包括对探地雷达数据、瞬变电磁雷达数据、定位数据以及摄影测量数据的实时采集、存储、关联与显示。

5.7.4 数据处理模块应包括对探地雷达数据、瞬变电磁雷达数据、位置时间信息及摄影测量数据的融合处理。其功能与要求如下:

(1) 探地雷达数据处理主要包括抑制干扰信号、增强反射波及地形校正等, 可采用数字滤波、偏移绕射处理、图像增强等技术方法。

(2) 瞬变电磁雷达数据处理包括数据校正、带通滤波、以及视时间常数、视电阻率、纵向电导等参数的计算。

(3) 数据融合处理应基于位置与时间信息, 对探地雷达数据、瞬变电磁雷达数据、摄影测量数据及基础地理信息数据进行关联处理。

5.7.5 数据解译模块应具备处理组合雷达数据及时间位置数据以识别目标异常点的功能。模块应对探地雷达三维数据体开展振幅、瞬时频率、相位、波形能量多属性分析, 自动提取反射同相轴、绕射双曲线特征; 支持单剖面、横向切片、纵向切片三维联动显示, 自动圈定介电异常区域并输出隐患平面范围、埋深参数。对于瞬变电磁雷达的已处理数据, 应能够显示衰减曲线、立体像图及等值线图, 并在二维与三维场景中展现数据的空间分布。该模块应实现于二维地电断面图中标示堤防隐患疑似分布区域, 并以图表形式输出相关结果。

5.7.6 成果展示内容应包括平面图、剖面图、截面图及三维透视图。成果宜按照设计间隔, 以多层析切片的形式予以呈现。

6 方案设计

6.1 工作任务

6.1.1 探测工作可分为普查与详查两个阶段, 原则上应遵循先普查后详查的次序。普查工作应能探测出堤防隐患的分布情况; 详查工作应能查明堤防各类隐患的性质、位置、埋深及范围, 宜在普查所反映的隐患分布堤段进行。详查阶段应增加测线与测点数量, 或采用多种方法进行综合探测。在探测过程

中，宜选取疑似隐患部位进行验证。验证工作可采用钻孔、探坑或触探等方法。

6.1.2 应根据目标体的平面范围与埋深确定测网面积，网格密度应依据目标体尺寸确定。测线间距宜保持相等，并应确保同一方向至少有 3 条测线经过目标体。单独采用探地雷达开展浅层隐患详查时，常规测线间距不宜大于 1m；护坡脱空、闸室混凝土检测测线间距不宜大于 0.5m。

6.1.3 探测范围应实现探测区域的全面覆盖，对于堤防出入口等区域宜适当扩大探测范围。测线末端宜超出探测区域边缘 10m。组合探测复测加密测线间距不应大于 1m；仅采用探地雷达开展异常详查复测时，加密测线、交叉测线间距不宜大于 0.5m。

6.1.4 应根据任务要求合理选用探测仪器。探地雷达核心设计参数包含天线中心频率、采样间隔、可控时窗、分段增益、叠加次数、横向采样点距。瞬变电磁雷达的技术性能参数包括工作装置、发射频率、同步方式、发射机的供电电压与电流及关断时间，以及接收机的采样率、采样道数、时窗范围、叠加次数、增益与同步方式等。

6.1.5 应依据任务书或合同规定，明确组合雷达探测的具体目标并细化相关技术要求。

6.2 资料收集

6.2.1 应根据工作任务要求，收集被探测堤段的设计资料、施工资料、加固资料以及历次洪水期的出险记录。

6.2.2 应收集穿堤建筑物的设计、施工与运行状况等相关资料。

6.2.3 应收集堤防工程的竣工验收资料。

6.2.4 应了解测区的电磁干扰情况。

6.3 踏勘

对于地电条件不明或存在特殊条件（如粘土、盐渍土、地下水位较浅）的地区，应组织现场踏勘，以了解测区周围环境、核实所收集资料、调查电磁干扰源及其特征等。踏勘阶段应重点记录测区内高压线、钢闸门、穿堤钢管、金属护栏等强电磁干扰源位置、分布范围，作为探地雷达天线选型、参数设计、测线布设避让的依据。

6.4 方法有效性分析

方法有效性分析应包括以下内容：

（1）探地雷达需分析隐患与堤身土体是否存在可分辨相对介电常数差异；瞬变电磁雷达分析目标体是否存在明显电阻率差异；

（2）判断目标体埋深是否处于组合雷达的有效探测深度范围之内；

（3）依据收集的堤防资料，设计适宜的地电模型，并通过正演方法分析目标层在正演曲线上的响应特征；

（4）参考以往的经验检测模式；

（5）当方法有效性无法确定时，应组织开展专门的方法有效性试验。

6.5 方法试验

6.5.1 现场正式工作开始前应进行试验工作。试验工作应根据探测目的与要求，选择具有代表性的部位或目标体情况已知的位置，并据此确定试验方案。

6.5.2 方法有效性试验应在方案设计前完成，观测参数选择的试验应在正式测量开始前完成。凡符合下列情况之一者，必须进行方法有效性试验：

（1）在堤防隐患埋深较大等复杂条件下进行探测，且方法有效性尚不明确的测区；

（2）电磁噪声干扰较为严重的地区；

（3）探测目标体与堤防路基之间的电性差异较小，或探测堤防隐患的规模相对于其埋深较小，以

致无法确定能否测出堤防隐患异常响应的测区。

6.5.3 试验工作内容应符合下列要求：

(1) 探地雷达试验应对比 1~2 组不同主频屏蔽天线，结合探测深度、图像分辨率、信噪比综合选定最优天线；同步开展瞬变电磁天线对比试验，确定适配回线尺寸；

(2) 当已知试验目标的位置或尺寸时，宜采用剖面法确定介质的电磁波传播速度；

(3) 应根据试验结果确定连续测量的移动速度；

(4) 应通过现场试验确定适宜的雷达采样率、包括时窗、增益、叠加次数及采样点距等参数。

6.5.4 试验结束后须及时开展资料处理与数据分析，并对试验效果进行评价。

6.5.5 试验数据应归档保存，试验成果可作为生产成果的组成部分。

6.6 工作参数选择

6.6.1 应依据已知地段或相似测区在类似地质条件下的实践经验，确定适宜的工作装置及相应工作参数。

6.6.2 探地雷达工作参数应符合下列规定：

(1) 天线中心频率的计算与选择

1) 在要求空间分辨率为 x 时，应按公式 (1) 计算：

$$f_c^R > \frac{75}{x\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

2) 存在尺寸为 ΔL 的地下非均匀体干扰时，应按公式 (2) 计算：

$$f_c^C > \frac{30}{\Delta L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

3) 在探测深度要求为 D 的情况下，应按公式 (3) 计算：

$$f_c^D > \frac{1200\sqrt{\epsilon_r - 1}}{D} \quad (3)$$

4) 当相对介电常数获取较为准确且探测设计较为合理时，应按公式 (4) 计算：

$$f_c^C > f_c < \min(f_c^C, f_c^D) \quad (4)$$

式中：

f_c ——天线中心频率，单位为兆赫兹 (MHz)；

x ——空间分辨率，单位为米 (m)；

ΔL ——非均匀体尺寸，单位为米 (m)；

D ——探测深度，单位为米 (m)；

ϵ_r ——相对介电常数。

(2) 时窗的选择应按公式 (5) 计算：

$$w = 1.3 \frac{2h_{\max}}{v} \quad (5)$$

式中：

w ——时窗，单位为纳秒 (ns)；

$h_{\max}$ ——最大探测深度，单位为米（m）；

v ——电磁波的传播速度，单位为米每纳秒（m/ns）。

（3）采样率的选择应按公式（6）计算：

$$\Delta t \leq \frac{1000}{6f_c} \quad (6)$$

式中：

Δt ——采样率，单位为纳秒（ns）；

f_c ——天线中心频率，单位为兆赫兹（MHz）。

（4）叠加次数的选择

点测法叠加次数不宜小于 32 次；连续剖面测量遇高黏、高含水堤段、信噪比偏低区域，叠加次数宜提升至 64 次及以上；护坡混凝土脱空检测可根据噪声水平降低叠加次数至 16 次。

（5）点间距的选择

点测法的测点间距可依据尼奎斯特采样定律按公式（7）计算：

$$n = 75 / (f_c \sqrt{\epsilon_r}) \quad (7)$$

式中：

n ——测点间距，单位为米（m）；

ϵ_r ——相对介电常数；

f_c ——天线中心频率，单位为兆赫兹（MHz）。

测点间距不应超过尼奎斯特采样间距，原则上应确保能够清晰、完整地反映异常细节，同时兼顾现场测试效率。同一异常反应应至少包含 3 个连续测点。

6.6.3 瞬变电磁雷达工作参数应符合下列规定：

（1）发射回线边长与发射电流的选择

探测深度与大地电阻率、发射磁矩（发射电流与回线面积的乘积）、环境噪声、仪器分辨率等因素相关。发射回线边长的选择应结合具体任务、目标体与围岩的电性参数以及发射系统性能等因素综合确定。原则上应确保具有足够大的发射磁矩，以保证接收信噪比达到要求。最大探测深度（H）可参考公式（8）进行估算：

$$H = 0.55 \left(\frac{L^2 I \rho_1}{\eta} \right)^{1/5} \quad (8)$$

$$\eta = R_m N \quad (9)$$

式中：

H ——最大探测深度，单位为米（m）；

L ——发射回线边长，单位为米（m）；

I ——发射电流，单位为安培（A）；

ρ_1 ——上覆地层综合电阻率， $\Omega \cdot m$ 单位为欧姆米（ $\Omega \cdot m$ ）；

η ——最小可分辨率电压，一般为 0.2~0.5 纳伏每平方米（nV/m²）；

R_m ——最低限度的信噪比，一般应不小于 3；

N ——噪声电平，单位为纳伏每平方米（ nV/m^2 ）。

发射电流强度的选择应综合考虑发射机性能、回线电阻大小等因素，在条件允许的情况下应尽可能提高发射电流强度。

（2）时窗范围的确定

时窗范围取决于测区内目标体的规模、电性参数的变化范围、地电断面类型、层参数及勘探深度等诸多因素，具体时窗范围应通过野外试验确定。

最长时窗可依据公式（10）进行估算：

$$t = \frac{H^2}{784 \times \rho(t)} \quad (10)$$

t 为断电后延时，单位为毫秒（ms）；

H 表示最大勘探深度，单位为米（m）；

$\rho(t)$ ——延时 t 时刻视电阻率，单位为欧姆·米（ $\Omega \cdot m$ ）。

对于中心回线装置，上述视电阻率值可依据晚期公式（11）计算获得：

$$\rho(t) = \frac{\mu_0}{4\pi t} \times \left(\frac{2\mu_0 M_q}{5t dB(t)/dt} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$M = IL^2 \quad (12)$$

式中：

$\rho(t)$ 为延时 t 时刻的视电阻率，单位为欧姆·米（ $\Omega \cdot m$ ）；

μ_0 为真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 单位为亨利每米（H/m）；

M 为发射磁矩，单位为安培平方米（ $A \cdot m^2$ ）；

q 为接收线圈有效面积，单位为平方米（ m^2 ）；

t 为衰减时间，单位为毫秒（ms）；

$dB(t)/dt$ 为磁场感应强度 B 关于时间的导数，单位为纳伏每平方米（ nV/m^2 ）；

I 为发射电流，单位为安培（A）；

L 为发射回线边长，单位为米（m）。

（3）叠加次数

采样叠加次数应根据野外现场实测的电磁噪声水平、干扰特征及探测速度经试验后确定（范围： $< n \times 1000$ 次，一般情况选择数百次叠加）。

（4）测量点距选择

测量点距的选择应遵循以下原则：在保证能够清晰、完整地反映异常细节特征的同时，兼顾现场测试效率。常规测量一般选择每米 10 个测点，即点距为 10cm；详细测量可选择每米 20 个测点，即点距为 5cm。

6.7 工作精度要求

6.7.1 工作精度应根据工作区域、具体任务及所采用工作装置的特点，以获取最佳探测效果为原则予以确定。

6.7.2 依据仪器技术性能及测区人文干扰状况进行合理设计，其总体精度不应超出当前设备所能达到的技术极限。

6.7.3 探地雷达精度控制以波形反射界面连续、隐患双曲线特征完整可辨为基础；整体遵循以能够有效观测与分辨探测对象所产生的最弱异常为准则，确保最大误差的绝对值小于任何有意义异常幅度的1/3。

6.7.4 瞬变电磁雷达的工作精度，一般采用不小于噪声电平三倍的平均绝对误差作为衡量标准。

6.8 方案编写

6.8.1 工作方案应在充分收集资料的基础上，结合对工作区的实地踏勘，并严格依据堤防探测合同或任务书的具体要求进行编制。

6.8.2 方案主要内容应包括：

（1）前言。涵盖以下方面：

- 1) 工作目的与任务：明确任务来源、具体工作内容以及预期达到的目标；
- 2) 测区概况：说明测区范围、自然地理条件、交通状况、气象特征、人文干扰环境及现场测试条件等；
- 3) 以往地质工作：简要叙述以往地质勘查资料、工作程度、主要地球物理特征、已有解释推断结果及其依据、存在的主要问题，并说明对既往资料的利用情况。

（2）探测区地质及地球物理特征。涵盖以下方面：

- 1) 地质概况：简述测区内地层、构造、水文地质条件及不良地质现象；
- 2) 地球物理特征：提供堤防土体、各类隐患、人工金属构筑物的相对介电常数、电阻率物性参数（参照附录A）；分别分析探地雷达、瞬变电磁雷达在本测区适用有效性，梳理影响探地雷达成像的电磁干扰源分布。

（3）野外工作方法和技术要求。涵盖以下方面：

- 1) 工作方法
 - ① 测区范围与测网布设方案及其确定依据；
 - ② 仪器设备选型、工作装置配置、关键参数选择及其依据；
 - ③ 试验剖面选取、试验内容安排及其依据；
 - ④ 电性参数测定工作的布置方案及其依据。
- 2) 测区布置及质量要求：简述测网设计、测线方向、点线编号规则、设计工作量等内容；
- 3) 质量要求。

（4）资料处理、解释及报告提交。涵盖以下方面：

- 1) 资料处理：简述拟采用的资料处理方法、处理目的、技术方案及处理流程；
- 2) 资料解释：简述资料解释方法、拟应用的解释软件及预期解释效果；
- 3) 报告提交：说明拟提交的成果图件种类及报告提交时间。

（5）项目组织管理与保障措施。涵盖以下方面：

- 1) 项目组织：说明项目承担单位、施工程序、计划投入人员构成；
- 2) 技术措施：阐述本次探测工作的技术特点、潜在技术难点及拟采取的针对性保障措施；
- 3) 简述安全生产措施与环境保护措施；
- 4) 工期及进度安排。

（6）经费预算。

(7) 设计附图。应包括以下图件：

- 1) 探测工作布置图及其依据图；
- 2) 测区地层与电性标志层综合对比柱状图；
- 3) 典型堤防雷达图像与电性剖面图；
- 4) 堤防区域既往工程地质勘查图。

7 探测

7.1 一般规定

7.1.1 测点定位应以堤防管理桩号为准。对于尚未设立管理桩的堤防段，应先行埋设管理桩，再进行隐患探测作业。已设有管理桩的堤防段，应首先核对桩号（千米桩、百米桩）的准确性。若名义桩号（管理桩标识桩号）与实际桩号差值超过 1m，应以实际桩号为准，并在报告中附具名义桩号与实际桩号的对比表等资料。

7.1.2 测线、测点及钻孔的测量工作宜采用水利水电工程项目所建立的测量控制网，测点桩号应与堤防桩号相对应。在尚未建立控制网的区域，应设置物探基点作为布设和测量的依据。

7.1.3 测点桩号的递增方向应与堤防桩号的递增方向保持一致。应每隔 100m 校核一次测点位置，当误差超过 2m 或测点间距时，应调整测点位置并进行记录，以确保其与堤防桩号的一致性。

7.1.4 测线布设应符合下列规定：

- (1) 测线布设应完整、连续，并应尽可能避开电磁干扰源；
- (2) 首次探测的测线布设应实现探测区域的全面覆盖，测线宜与堤防走向平行，相邻测线的旁向重叠宽度不宜小于 10%；
- (3) 当堤顶宽度大于 4m 时，宜沿迎水面与背水面堤肩各布设一条测线；采用探地雷达开展护坡、堤坡浅层隐患详查时，应沿坡面增设平行测线，必要时布置垂直堤身横向剖面追踪异常范围；可根据追踪隐患分布的需要，在堤顶中线、堤脚处布设测线；

(4) 重点探测区域或普查异常区域的测线应进行加密布设或交叉布设；

(5) 使用三维雷达矩阵天线进行探测时，相邻测带的搭接宽度不宜小于矩阵宽度的 1/4。

7.1.5 探地雷达探测应符合下列规定：

(1) 应根据探测任务、探测目标或目标层的范围与深度，选择不同主频的天线。探测深度较大时，宜选用主频较低的天线；进行浅层探测时，宜选用频率不高于 500MHz 的天线；地形起伏较大时，宜选用分体式天线；

(2) 探测堤身隐患时，中心频率的选择应兼顾探测深度与分辨率；

(3) 探测护坡脱空及破坏范围时，宜选用中心频率不低于 250MHz 的天线，采样率宜为天线频率的 15 倍至 20 倍，时窗控制在 300ns 以内；

(4) 进行连续测量时，天线移动速度应与扫描速率相匹配，探地雷达单点隐患双曲线特征完整显示，异常段有效扫描道数不应少于 10 道。；

(5) 探测时，天线标记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应小于天线宽度的 1/3；

(6) 高通截止频率宜小于天线频率的 1/4，低通截止频率宜大于天线频率的 2 倍；

(7) 仪器信号增益应保持信号幅值不超过信号最大动态范围的 3/4，且天线静止时信号应保持稳定；高含水软土、淤泥堤段宜采用线性自动增益，混凝土护坡宜采用固定增益。

(8) 在泵站及水闸等场所，探地雷达可使用高频雷达天线进行混凝土层脱空等浅层探测；

(9) 使用三维雷达矩阵天线探测时，相邻测带的搭接宽度宜大于矩阵宽度的 1/4。

(10) 探地雷达作业时天线必须紧贴探测介质表面，堤坡探测可采用防滑支架，空隙大于 5cm 时需垫透水薄垫层，防止空气层产生虚假强反射干扰图像。

7.1.6 瞬变电磁雷达探测应符合下列规定：

(1) 测线应避开金属物体、高压电力线等干扰源，探测表面相对于天线尺寸宜保持平整且无障碍物；

(2) 探测大范围松散体、砂层等隐患宜选用重叠回线装置；探测渗漏通道及小范围松散体、砂层等隐患宜选用中心回线装置；

(3) 应根据探测要求选择回线边长、匝数及供电电流，以确保具备足够的发射磁矩。

7.1.7 探测过程中，应在班报中完整记录堤防外观状况、测线内高压线、金属护栏、穿堤钢管、钢闸门等电磁干扰源；同步记录探地雷达天线频率、时窗、叠加次数、增益、移动速度等实时采集参数。

7.1.8 现场工作应对测网进行标识，现场探测应依据预先标识的测网有序进行，各类探测仪器的工作参数应保持一致。

7.1.9 应综合探测区域地质资料、管线布设情况、地上与地下设施分布情况及周边工程环境等调查数据，进行综合判断与解译、成果定性及隐患成因分析。

7.2 探测准备工作

7.2.1 应收集与探测相关的资料，主要包括以下内容：

- (1) 探测区域近期路面塌陷、沉降及裂隙等相关资料；
- (2) 堤防结构及改造、大修与中修等相关资料；
- (3) 与探测相关的其他资料。

7.2.2 雷达探测应制定高效可行的探测方案，方案内容应包括：

- (1) 探测工作的重点、难点及应对措施；
- (2) 探测内容、探测范围、测网（线）布设及探测工期；
- (3) 技术依据、现场探测安排及工作量评估；
- (4) 仪器设备、车辆、工程材料和安全防护装备等配备；
- (5) 施工组织与探测计划；
- (6) 质量和安全保证措施；
- (7) 拟提交的成果资料。

7.2.3 探测作业实施前，应组织完成探测方案技术交底、仪器操作培训及安全培训；交底内容应包含探地雷达天线选型、参数设置、干扰避让、异常现场识别要点。

7.3 数据采集

7.3.1 数据采集工作须满足任务需求，并应符合现行行业标准《堤防隐患探测规程》（SL436）的相关规定。

7.3.2 探测参数的设定应能充分满足堤防探测的技术要求。参数设定工作应于探测准备阶段完成，依据设备性能、探测环境及技术要求，通过现场实测后予以确定，以确保达到最优探测效果。

7.3.3 探测作业开始前，应进行设备调试，确定雷达发射波形、发射频率、采样频率、采样时窗、采样道数、叠加次数及信号增益等参数。

7.3.4 现场采集过程中，应清除测线邻近区域的金属物体，若无法清除或避让，则须做好相应记录。采集时按照附录 B 表 B.1 完整填写探测记录，探地雷达天线主频、时窗、叠加次数、采样点距等关键参数必须逐项记录，不得空缺。

7.3.5 采用连续测量方式时，探地雷达移动速度全程匀速，最大行进速度不得超过 10km/h，通过目标体的扫描道数宜不少于 10 道；采用点测方式时，天线应保持静止状态，单点采集完成后方可移至下一测点。

7.3.6 对异常点附近区域应进行测点加密。若瞬变电磁曲线呈现衰减迟缓现象，则应扩大时间范围

进行重复观测。

7.3.7 同一测点重复观测数据误差较大时，须查明原因。若存在干扰源，可通过移动测点位置予以避让并重新测量，同时应进行详细记录。

7.3.8 探测过程中，作业单位须加强自检与自查工作，根据探测进度定期实施过程检查与资料审核。当发现原始资料不完整或质量不符合要求时，应及时组织补测或重测；对遗漏路段，应进行补充探测。

7.3.9 数据采集期间的现场作业安全管理，应符合现行行业标准《堤防工程施工规范》SL260 的相关规定。

7.4 数据处理

7.4.1 数据处理应涵盖探地雷达数据、瞬变电磁雷达数据、位置信息及摄影图像等内容。

7.4.2 探地雷达介电电磁波速度的确定方法应结合现场实际情况选定，可选择下列方法之一：

- (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) 用透射法、宽角法或中心点法确定。

7.4.3 瞬变电磁雷达视深度的确定，在场地已知地电参数较少的情况下，可采用已知目标体的埋藏深度及采样点时间反算电磁波传播速度，进而依据公式 $H=V \cdot t$ 计算整个断面异常体的深度。在不同堤防工程中，亦可采用经验速度值进行计算。

7.4.4 数据处理应符合下列规定：

(1) 数据处理须遵循信号保真性原则，有效信号深度应满足技术要求，预处理结果须符合解译工作需要；

(2) 数据处理前，应确保原始数据完整、可靠、有效，发现问题时应重新探测或补测；

(3) 可根据实际情况对采集数据实施去噪处理、干扰信号去除及数据滤波处理；

(4) 探地雷达标准处理流程：剔除无效道，直流漂移消除，水平归一化，分段增益均衡，地形校正，高通/低通滤波， f - K 倾角滤波，反褶积，绕射偏移处理，空间平滑；洞穴、管线等点状异常须执行偏移处理；

(5) 瞬变电磁雷达数据处理在必要时应对发射电流关断时间的影响进行改正，并换算视电阻率、视深度、视纵向电导等参数。在堤坡上进行探测时，宜对早期电磁响应特征实施地形校正；

(6) 应对比地表特征与组合雷达数据，以排除人工埋藏物造成的干扰；

(7) 应对比雷达图像与典型视电阻率断面，从而确定异常点；

(8) 原始数据应及时归档，确保其可追溯性。

7.4.5 三维雷达单剖面数据处理完成后应形成三维数据体。建议根据目标体的三维尺寸设定层析切片间距，并输出包含切片图、截面图及剖面图的三维雷达数据图像。

7.4.6 建议在三维图像上对目标体的空间分布范围进行位置标记，并保存标记后的图像。

7.5 资料解释与验证

7.5.1 解译工作应结合堤防历史沿革、加固情况、汛期险情记录、防汛水位及探测班报等资料进行；同时应综合地质、设计、施工、岩土试验和钻探等资料开展综合分析；宜对探测目标在剖面、平面及空间上的分布特征进行统计分析，并以综合图表形式呈现。

7.5.2 资料解译须遵循以下基本要求：

(1) 应综合分析测区地质条件、物性特征及干扰状况，并在实地查证基础上，最终确定目标体的埋藏深度、产状及其空间分布，为工程验证提供依据；

(2) 解释工作需充分考虑测区内各类复杂因素对不同部位观测结果可能产生的影响；

- (3) 应选取典型剖面，遵循从局部到整体、从已知到未知的原则开展解释；
- (4) 应依据定位信息与测量数据，确定堤防隐患的坐标与相对位置，并进行系统编号；
- (5) 应根据数据解译结果，确定堤防隐患的平面展布范围及埋藏深度；
- (6) 目标体的空间位置宜通过三条及以上测线予以确定，结构面走向应由两条及以上测线确定；
- (7) 对异常体的水平位置及顶界面埋深宜进行定量计算；对其底界面宜进行半定量解释。

7.5.3 探地雷达资料解释应符合下列要求：

- (1) 异常识别要素应包括反射波波形、能量强度、相位、同相轴连续性、双曲线曲率、绕射波分布等特征；
- (2) 资料解释内容包括有效波同相轴的识别与追踪、反射波的提取、有效异常的判定以及隐患分类原则的确定；
- (3) 宜首先通过已知信息与雷达图像进行比对，建立测区内探测目标的反射波组特征模型，进而推广至其他剖面进行识别；
- (4) 宜依据反射波组的波形与能量特征进行同相轴追踪，以识别反射波组界面；
- (5) 单个异常体可根据其波形双曲线形态、能量及频率特征进行识别；
- (6) 对于多测线雷达探测数据，应对比相邻测线的雷达剖面图，识别具有相似图像特征的反射信息，开展对比分析；
- (7) 应根据上覆介质的电磁波速度参数进行时间-深度转换，确定隐患埋深；隐患性质宜结合地质资料综合判定；
- (8) 应对三维数据体开展振幅、频率及相位等属性分析，并利用三维数据体显示功能进行目标体空间形态分析与三维建模；
- (9) 用于地质结构面探测时，宜对结构面的走向、倾角等产状信息进行统计，计算反射结构面的视走向；宜根据不同测线上雷达同相轴的视走向，计算反射结构面产状或圈定异常体的空间位置；
- (10) 应绘制雷达解释剖面图，图中需标明堤身高度、勘探点位置，以及隐患的性质、位置、埋深和堤身质量分类结果等信息；
- (11) 同一剖面的多幅探地雷达图像宜拼接为一幅完整的剖面成果图，其纵横坐标比例应保持一致；
- (12) 多条平行测线探地雷达数据应拼接形成连续剖面，相邻测线同一异常波形特征、埋深应可对应，无法对应时应复测。

7.5.4 瞬变电磁法资料解释应符合下列要求：

- (1) 瞬变电磁异常识别要素应包括视电阻率值、异常形态、异常的纵向延伸、连续性以及异常内部信息；
- (2) 定性解释应以瞬变电磁法理论及模拟图件为基础，以地质条件与物性特征为前提，结合工区实际施工情况与干扰状况，依据瞬变电磁衰减曲线图、多测道剖面曲线图及视电阻率-时间拟断面图进行异常定性解释，初步划分背景场，判断异常性质、形态与产状；
- (3) 定量解释：在定性解释基础上，综合其他地质与地球物理资料，建立初始地电模型，进行时深转换及正反演定量解释；
- (4) 图件编绘应包括：
 - 1) 实际材料图，内容需涵盖：
 - ① 测区范围、测网及电磁干扰分布位置；
 - ② 点线编号、典型剖面位置等。
 - 2) 视电阻率拟断面图；
 - 3) 综合剖面图，内容可包括：多测道感应电压剖面曲线、 ρ_r 拟断面图、正反演电阻率断面图等；
 - 4) 推断解译成果图，内容可包括：地下管线、构筑物及堤防隐患的推断解译剖面图、平面图及三

维图等。

7.5.5 堤防隐患异常点的识别应依据表 3 所列规定进行解译。

表 3 堤防隐患的异常雷达图像特征汇总

类型	探地雷达图像特点	瞬变电磁雷达图像特点
洞穴	在雷达图像上一般表现为洞穴区弱反射体特征，洞穴区两侧倾斜的水平状反射波和不规则的散射波、洞穴区垂直界面断面波、洞穴区下方较大形态不规则散射波、洞穴区顶界面强反射面、洞穴区底界面底部连续水平状反射波等特征。	洞穴在视电阻率断面呈高电阻率，顶面以异常顶部为准，断面图上呈现类似圆形、椭圆形高阻分布，浅部洞穴异常与实际洞穴形状接近，视电阻率值高于周围土体。
裂缝	双曲线或断续反射；倾斜或垂直分布的线性反射信号，高振幅短反射同相轴；绕射与散射。	充水/黏土填充裂缝在视电阻率断面呈低电阻率；空气/干燥裂缝在视电阻率断面呈高电阻率；破碎带或密集裂隙表现为大面积低阻区，衰减曲线整体平缓，电阻率反演剖面显示为不规则低阻团块。
松软层	均质层状松软层在雷达剖面上表现为连续、平滑的同相轴（反射波组），与上下地层形成清晰界面，非均质松软层表现为无规则或杂乱反射；松软层与围岩介电差异小表现为低振幅，松软层与围岩差异显著表现为高振幅。	充水或高黏土含量松软层在视电阻率断面呈低电阻率；干燥、低含水或黏粒含量松软层在视电阻率断面呈高电阻率。均质淤泥或黏土层在电阻率剖面上呈连续水平低阻带。局部沉积的有机质或软黏土显示为孤立低阻团块。
高含砂层	均质高含砂层雷达剖面上表现为弱反射或无明显同相轴；非均质性高含砂层雷达剖面上表现为局部高振幅反射。	干燥/低含水砂层在视电阻率断面呈高电阻率；含水砂层视电阻率断面呈低电阻率。
护坡脱空区	空气填充脱空表现为强振幅双曲线反射，脱空顶/底界表现为水平或弧形反射界面，在脱空区顶-底界面之间可能形成周期性重复反射。	视电阻率断面为高电阻率，顶面以异常顶部为准，断面图上呈现横向条带状高阻分布，视电阻率值高于周围土体。
砂砾石层	反射信号表现为杂乱、不连续的短反射，振幅衰减快，高频雷达波（如1GHz以上）易被散射，剩余信号以低频为主，地层分辨率降低。	孔隙充水或含黏土矿物砂砾石层，电导率较高（低电阻率），TEM衰减曲线表现为早期快速衰减，晚期信号较弱；干燥或胶结良好的砂砾石层电阻率高，TEM衰减曲线衰减缓慢，信号持续时间较长。低阻砂砾石层（如冲积扇含水层）TEM视电阻率断面呈低阻带状或透镜状；高阻砂砾石层（如冰川沉积或风化层）视电阻率断面呈相对高阻块状，与围岩（如黏土或基岩）分界明显。非均质性砂砾混合层衰减曲线不规则。
渗漏	反射同相轴异常，同相轴局部扭曲或中断；渗漏集中区（如管道破裂处、土体裂隙）形成高振幅反射，图像中呈亮色斑块或条带；	在TEM视电阻率断面图中，渗漏区呈局部低阻闭合圈（点状渗漏）或低阻条带（线性渗流路径）；集中点状渗漏为局部低阻闭合圈（如管道破裂点），

	高电导率流体（如盐水、污水）吸收雷达波能量，导致渗漏区下方信号快速衰减，深层反射模糊或消失。	线性裂隙渗流为低阻条带沿裂隙走向延伸（如堤坝裂缝），面状浸润扩散为大面积低阻区，边界模糊（如地下水入渗）。
管涌	垂向或倾斜的“带状高反射异常”，原连续地层反射界面出现局部弯曲或中断（如“下拉”效应）	管涌主通道在电阻率断面中呈近垂直或倾斜的低阻条带，与水力梯度方向一致；管涌出口处（如堤坝坡脚）常表现为低阻区向外扩散，反映水流携带颗粒涌出后的浸润范围。

7.5.6 宜根据隐患的分布情况、背景值、图像特征等，将所探测堤防进行分类。分为未发现隐患段、隐患相对发育段和隐患发育段。

7.5.7 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、高含沙层等隐患的堤段，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，应予合并，视为一个隐患发育段。

7.5.8 探地雷达识别的重大洞穴、大面积脱空、集中渗漏高风险异常，应优先采用钻孔、探坑进行现场验证并取样土工试验。验证点宜取样做土工试验。

7.6 质量检查与评价

7.6.1 应从资料的完整性、齐全性、工作参数选择、原始数据质量、噪声干扰水平和质量检查与误差统计的规范性等方面进行。主要包括以下内容：

- （1）探地雷达提供检查和评价的资料应经过初步编辑，编辑内容含测线号、里程桩号、剖面深度等；
- （2）探地雷达检查观测的图像与原始图像的异常形态与位置应基本一致，且两次观测的同一异常水平位置应保持在工作比例尺的平面图上不大于 1mm，而深度相对误差不应大于 10%；
- （3）瞬变电磁雷达数据质量的定性评价：对相邻延时道的衰减曲线进行分析，一般来说，衰减曲线连续性好的数据质量可靠，反之，衰减曲线连续性不好的数据质量不可靠；
- （4）瞬变电磁雷达测区噪声干扰水平分析：测区的噪声干扰水平对晚期道的数据质量影响大，晚期道的数据信噪比≥3 的测道数据才可靠；
- （5）瞬变电磁雷达测区工作参数选择的分析：应对工作参数（发射电流、发射线框边长、时窗范围、固定增益、叠加次数等）进行评价；
- （6）瞬变电磁雷达原始曲线质量评价。原始曲线质量分为：甲级、乙级、丙级。评价标准如下：
 - 1) 甲级：曲线圆滑、连续性好、曲线形态清楚，在有效观测窗内无畸变测道；
 - 2) 乙级：曲线较圆滑、连续性好，在有效观测时窗内有个别畸变道，但不影响曲线整体形态，经处理后可用于资料解释；
 - 3) 丙级：曲线形态不清，不能满足乙级的要求。

（7）在进行误差统计时，只统计设计时间窗内的测道，系统检查结果应满足设计工作精度要求。

7.6.2 多台仪器工作时，系统质量检查应按照“一同三不同”（同点位、不同天、不同仪器、不同操作员）；单台仪器工作时按照“二同二不同”（同点位、同仪器、不同天、不同操作员）的要求进行。

7.6.3 系统质量检查不应低于总工作量的 5%。检查点应在全测区分布均匀，对异常地段、可疑点、突变点重点检查。

7.6.4 系统质量检查时应绘制质量检查对比曲线和误差分布曲线并附误差统计表。

8 成果

8.1 一般规定

8.1.1 堤防隐患探测成果应遵循解译正确、定位准确、科学有据、结论明确、易于处置的原则。

8.1.2 堤防隐患探测成果应包括下列内容：

- (1) 数据解译结果；
- (2) 堤防隐患位置信息；
- (3) 异常点定位与钻探验证；
- (4) 堤防隐患成因分析及处置建议；
- (5) 探测报告编写。

8.2 雷达数据解译结果

数据解译结果信息应包括：

- (1) 异常类型、形状、埋深及规模等；
- (2) 文字报告和成果图件。

8.3 堤防隐患位置信息

8.3.1 堤防隐患位置信息应有高精度定位设备确定，包括坐标、现场标注和位置文字描述。

8.3.2 堤防隐患位置信息应及时存档，便于堤防养护人员准确定位和后期追溯。

8.4 异常点定位与验证

8.4.1 堤防隐患探测成果的验证应确定堤防隐患的类型、埋深、位置大小等属性。

8.4.2 成果验证点应根据堤防隐患类型、场地条件和危害对象的重要性等因素进行选择，成果验证点的数量应符合规定。

8.4.3 应结合场地岩土体工程特性，选取合规的隐患验证手段，可采用目视巡查、钻探、洛阳铲探、静力触探、动力触探、坑探、槽探、机械开挖探查、孔内内窥、其他物探手段比对等方式；隐患验证准确率不宜低于 90%。

8.4.4 异常点定位应根据坐标信息进行现场标注，并将异常点信息汇总到堤防隐患疑似目标信息汇总表（附录 B 表 B.2）。

8.4.5 异常定位点与钻探验证应符合以下规定

- (1) 应对拟钻孔位置现场标注；
- (2) 钻探前，应查明地下构筑物等设施状况，不得损坏或影响原有地下设施的运行和维护；
- (3) 钻探前，应及时对存在堤防安全隐患区域进行围挡并放置警示标志；
- (4) 钻孔成果应汇总到堤防隐患钻探验证结果表（附录 B 表 B.3）；
- (5) 堤防钻孔结束后应及时封孔，应按《堤防工程地质勘察规程》SL188-2005 的规定进行回填，钻孔回填材料结构强度应高于原结构强度。

8.4.6 成果验证完成后，依据钻孔、探坑实测数据修正探地雷达时深转换波速，同步更新雷达剖面埋深标注、隐患范围及文字解译结论。

8.5 堤防隐患成因分析及处置建议

8.5.1 应结合探地雷达剖面波形特征、异常空间分布形态，搭配隐患类型、规模、土质、地下水环境、周边构筑物信息综合判定隐患成因。

8.5.2 堤防隐患处置建议应参考堤防隐患的类型、等级、深度、面积、位置等信息，并应符合表 4 的规定。

表 4 堤防隐患处置意见汇总

隐患类型	规模	位置	危害程度	紧急程度	处置建议
洞穴					
裂缝					
松软层					
高含砂层					
护坡脱空区					
砂砾石层					
渗漏					
管涌					

8.5.3 根据堤防隐患类型，结合隐患路段现场施工条件，应因地制宜选择开挖修复或非开挖修复。

8.6 探测报告编写

8.6.1 报告编写应根据任务书、设计书、设计批复意见及有关标准和要求进行。

8.6.2 报告编写应在系统收集、分析、整理工作区所需地质、水文等有关资料的基础上编写。

8.6.3 完成探测工作后，应对资料全面整理，填写堤防隐患探测工作量汇总表（附录 B 表 B.4）和堤防隐患信息卡（附录 B 表 B.5）。

8.6.4 探测报告应详细、完整反映探测过程，数据真实、内容完整、结构严谨、结论准确；报告附图、附件目的明确、配置合理、美观整洁。

8.6.5 探测报告应包括以下内容：

（1）前言

- 1) 工作目的与任务：任务来源、任务书编号、具体任务，通过工作达到的目的；
- 2) 测区概况：测区范围、地理坐标及所属行政区划、地形特征等；
- 3) 任务完成情况及主要成果：简述工作过程、起止时间、完成的实物工作量、取得的主要探测成果。

（2）地质与地球物理特征

- 1) 以往地勘工作：简述以往开展过的地质及物探工作及其成果和存在问题；
- 2) 地质概况：测区地质特征，与目标任务有关的地层、构造、地下水活动等；
- 3) 地球物理特征：以往及本次工作取得的物性参数统计结果、物性特征分析、地球物理前提分析。

（3）工作方法 with 质量评价

- 1) 工作布置：采用工作方法、比例尺、测网、测线方向、点线号编排等；
- 2) 测地工作：工作所使用的仪器、仪器性能及校验、基线、测线敷设方法及施测技术要求、坐标与高程的引入；质量检查方法、质检点分布、质检率、精度统计结果等；

3) 数据采集、数据处理及图示

- ①仪器：观测所用仪器、仪器技术参数指标、仪器检查调节与性能试验等；
- ②现场方法试验分析，重点说明探地雷达天线主频比选、电磁波波速标定试验过程与结论，列明全测区统一采用的雷达采集参数；

③野外观测方法、质量检查、误差统计等；

④物性工作：物性标本的采集、测定及质量检查、物性参数的统计等。

（4）资料整理与处理

- 1) 资料整理：资料整理方法、各项改正及其改正的误差统计等；

- 2) 数据处理：数据处理采用的方法及目的；
- 3) 图件编绘：基础图件及成果图件的编制方法、比例尺、图例、图件内容、图件的整饰等。

(5) 资料解释

- 1) 异常的识别与分类：异常的识别、分类原则、异常编号以及异常特征描述；
- 2) 异常的解译：对各物探异常逐一开展定性判释与定量反演；对具备重要地质特征的异常、全部推断堤防隐患异常实施定量反演，确定异常场源体的埋深、空间形态、产状及延展范围等参数。针对有效异常逐条列明定性推断依据、定量反演手段，并开展定性、定量综合推断成果可靠性评价。

(6) 结论与建议

- 1) 取得的主要成果、方法应用效果分析等；
- 2) 处置建议；
- 3) 其他成果与建议。

(7) 附图。应包括：

- 1) 基础成果图：实际材料图、剖面图、平面图、拟断面图、断面图；
- 2) 解释推断成果图：综合剖面图、综合平面图、异常验证及钻孔布置图。

(8) 附表。

9 堤防隐患信息管理

9.1 一般规定

9.1.1 堤防隐患探测应建立信息管理系统，对探测数据进行查询、统计分析与管理。

9.1.2 堤防隐患信息管理内容应包含探地雷达原始波形数据、雷达处理剖面、三维切片成果、瞬变电磁雷达数据、高精度定位坐标、现场影像、堤防隐患属性、地下构筑物分布等多源数据。

9.1.3 堤防隐患信息管理数据库应包括基础地理信息数据库、三维模型数据库、基础自然环境数据库及动态监测等数据库。

9.2 建立隐患数据库

9.2.1 数据采集的坐标系应与堤防隐患所在地基础地理信息采集用的坐标系一致。

9.2.2 各类数据的数据结构应包括字段数量、字段名称、字段类型、字段长度、小数点位数、完整性约束及说明等。

9.2.3 数据应以电子文件形式提供，文件类型可包括文本文件、探地雷达数据、瞬变电磁雷达数据、GPS 数据、图像文件、图形文件、视频文件等，文件格式应符合表 5 的规定。

表 5 电子文件类型与格式

文件类型	文件格式
文本类型	TXT、DOC、PDF、XLS、XML
探地雷达数据	SGY、DZT、RD3、DT、DT1、DAT、TXT、BIN
瞬变电磁雷达数据	UEP、SGY、DAT、TXT、BIN
GPS数据	STH、CSV、TXT、XLS
图像文件	JEGP、TIFF、PNG、BMP、PSD
图形文件	DWG、CRD、SVG
视频文件	MPG、AVI

9.2.4 探地雷达入库数据完整包含原始回波信号、经校正/偏移处理后的二维剖面、三维数据切片、测线坐标、异常特征点、钻探验证点位、对应天线参数记录表；并应符合下列规定：

- (1) 雷达信号数据以文件的形式存储于数据库中，以其测线的编号进行命名，且须与测线一一对

应；

(2) 雷达剖面、三维切片影像关联存入雷达测线数据表，影像内标注隐患编号、埋深、介质波速等关键参数，不单独建表存储。

9.2.5 瞬变电磁雷达数据应包括感应电压数据、经处理后得到的视电阻率、纵向电导、测线的特征点以及钻探验证点等数据，并应符合下列规定：

(1) 瞬变电磁雷达数据以文件的形式存储于数据库中，以其测线的编号进行命名，且须与测线一一对应；

(2) 瞬变电磁雷达输出的图形数据存储在测线数据表中，不单独建表。

9.2.6 隐患编号宜采用“探测堤防区号+检测日期+探测路段编号+隐患编号”四段代码组合，并应符合下列规定：

(1) 探测堤防区号应以堤防区号编码规则；

(2) 探测日期应为探测某堤防路段的日期，应采用六位数表示，包含年份、月份与日期，前两位为探测年份的最后两位数，后两位为探测月份，再后两位为探测日期；

(3) 探测路段编号应为方便记录而拟定的探测路段编号，采用三位数表示；

(4) 隐患编号应采用两位数字表示，以发现隐患的先后进行编号，每条道路的隐患均从“01”开始编号，且每条路的隐患编号具有唯一性。

9.2.7 隐患风险等级应包括很低、较低、中等、较高、极高 5 个等级，分别对应并采用数字“1”、“2”、“3”、“4”、“5”进行编码。

9.2.8 数据库建立应符合以下规定：

(1) 数据入库前应进行质量检查；

(2) 数据应及时更新，保证其准确性与有效性，并做好历史数据备份；

(3) 数据库应对时态数据进行存储和管理；

(4) 数据的安全保密应符合国家现行相关标准的规定；

(5) 数据库建立应结合项目需求和相关标准规范的要求，满足系统高效运行和查询检索的需要。

9.3 隐患信息管理系统

9.3.1 隐患信息管理系统宜采用客服端/服务器及浏览器/服务器两者组合服务模式。

9.3.2 隐患信息管理系统宜提供服务器端、网络端及移动端应用。

9.3.3 隐患信息管理系统应定期进行软件维护、数据维护、运行环境维护等。

9.3.4 隐患信息管理系统应具备下列功能：

(1) 多源隐患数据的二三维一体化展示、入库、管理、编辑、输出；

(2) 对隐患数据进行查询、统计、成因分析，并以图表形式输出；

(3) 多源隐患数据的更新。

9.3.5 运行环境应包括网络、服务器等硬件环境，操作系统、数据库及地理信息系统等支撑软件环境，以及信息安全支撑环境等。

9.3.6 系统网络环境应符合下列规定：

(1) 网络的安全性、可靠性、可扩展性符合国家现行相关标准的要求；

(2) 内外网应物理隔离，对需进行内外网数据交换的应采用专门的内外网数据交换设备；

(3) 应建立相应的网络管理制度，配备网络运行维护人员，保障系统网络的稳定运行。

9.3.7 系统服务器与终端环境应符合下列规定：

(1) 服务器和存储设备的型号及数量应根据系统并发访问数量及预期数据量等因素选择配备；

(2) 服务器应包括数据库服务器、应用服务器及相应的数据备份服务器；

(3) 用户终端计算机设备应满足各类地理信息数据浏览和访问的功能需要

9.3.8 数据库管理系统应符合下列规定：

- (1) 应具有海量空间数据存储管理能力；
- (2) 应支持空间数据和属性数据的统一存储；
- (3) 数据库字段应支持探地雷达数据、瞬变电磁雷达数据、高精度定位数据、影像数据、矢量数据、多媒体数据、电子文档数据等的存储；
- (4) 应具备有可靠的数据备份和恢复机制。

9.3.9 地理信息系统应符合下列规定：

- (1) 宜选用国产地理信息系统平台；
- (2) 应支持空间数据和属性数据的统一操作；
- (3) 应具有丰富的空间数据管理、查询和分析能力；
- (4) 应具备海量空间数据处理能力，达到基本运行性能；
- (5) 应支持通用的地理信息交换数据格式；
- (6) 应具备数据分发服务功能；
- (7) 应具有二次开发接口，满足地理信息应用开发需要。

9.3.10 系统安全设计应符合现行国家标准《信息安全技术信息系统安全等级保护基本要求》GB/T 22239 的有关规定。

附录 A （规范性附录）堤防常见介质的物理参数表

表 A.1 常见介质的物理参数

介质	相对介电常数	电导率/ $\text{ms} \cdot \text{m}^{-1}$	传播速度/ $\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$	衰减系数/ $\text{db} \cdot \text{m}^{-1}$
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
海水	80	1000~10000	0.01	1000
冰	3~4	0.01	0.16	0.01
干砂	3~6	0.01	0.15	0.01
湿砂	20~30	0.1~1.0	0.06	0.03~0.3
饱和砂	23~30	0.1~1.0	0.06	0.03~0.3
泥砂	5~30	1~100	0.07	1~100
粘土	5~40	2~1000	0.06	1~300
砂岩	6	0.04	/	/
泥岩	5~15	1~100	0.09	1~100
页岩	5~13	10~100	0.09	1~100
石灰岩	4~8	0.2~2	0.11~0.12	0.4~1
石英	5~30	1~100	0.07	1~100
花岗岩	4~6	0.01~1	0.13	0.01~1
岩盐	5~6	0.01~1	0.13	0.01~1
混凝土	4~20	1~100	0.11	/
钢管	∞	9.93×10^6	/	/

注：表中“/”表示没有确切范围。

附录 B （规范性附录）堤防隐患探测表

表 B. 1 堤防隐患探测原始记录表

填报单位：

项目名称			探测路段	
探测设备/编号			仪器参数设置	
测线编号	测线		探测方向	备注
	起点	终点		
备注：				
记录人：	审核人：	探测时间：	第_页 共_页	

表 B. 2 堤防隐患疑似目标信息汇总表

填报单位：

序号	编号	测线	中心桩号	隐患性质	顶部埋深（m）	备注
1						
2						
3						
4						
5						
6						
填报人：		审核人：	时间：			第_页 共_页

表 B. 3 堤防隐患（异常）钻孔验证结果

填报单位：

序号	编号	测线	钻孔点情况			
			顶深（m）	底深（m）	净深（m）	备注
1						
2						
3						
4						
5						
6						

记录人：	审核人：	时间：	第_页 共_页
------	------	-----	---------

表 B. 4 堤防隐患检查工作量汇总表

填报单位：

序号	堤防名称	起始点位置	堤段长度（m）	堤顶长度（m）	长度（m）	测线	
						数（条）	总长（m）
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
总计							
填报人：		审核人：		时间：		第_页 共_页	

表 B. 5 堤防隐患信息卡

填报单位：

编号		堤防名称		
隐患类型		缺陷等级		
平面面积（m²）		中心坐标	X	
埋深（m）			Y	
位置描述				
雷达剖面		隐患位置剖面图		
隐患周边设施		现场照片		
成因初步分析				
处置建议				
编制人：	审核人：	备注：	第_页 共_页	

附录 C （资料性附录） 典型探地雷达波谱

C. 1 正常堤防雷达波谱

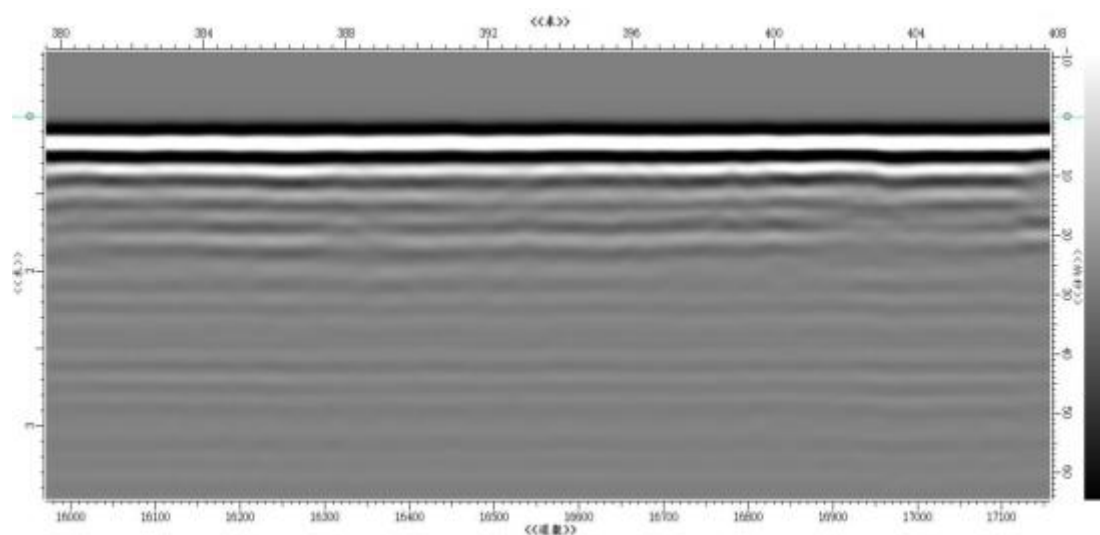


图 C. 1 正常堤防雷达波谱

C. 2 地下管道雷达波谱

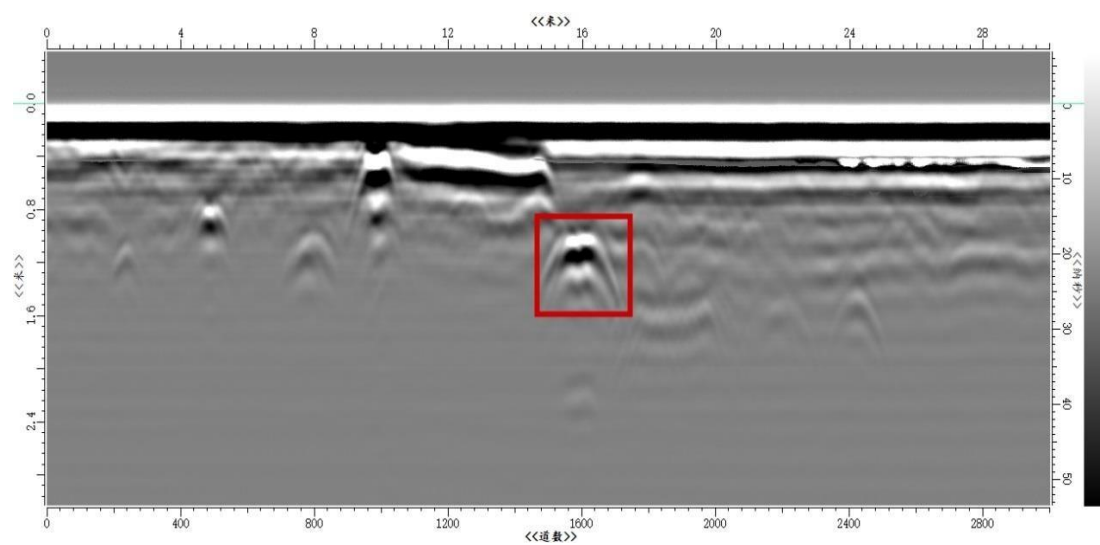


图 C. 2 地下金属管道雷达波谱

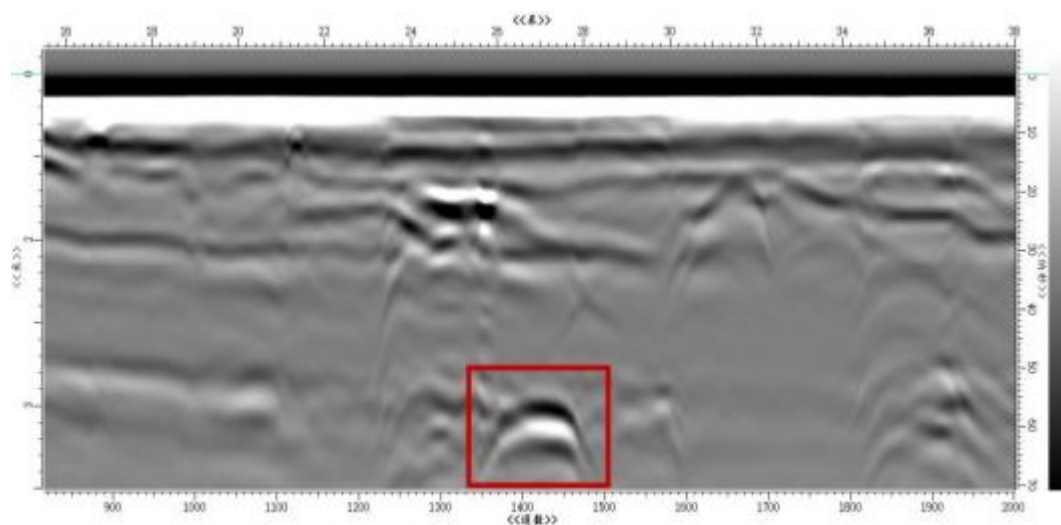


图 C. 3 地下混凝土管道雷达波谱

C. 3 地下设施雷达波谱

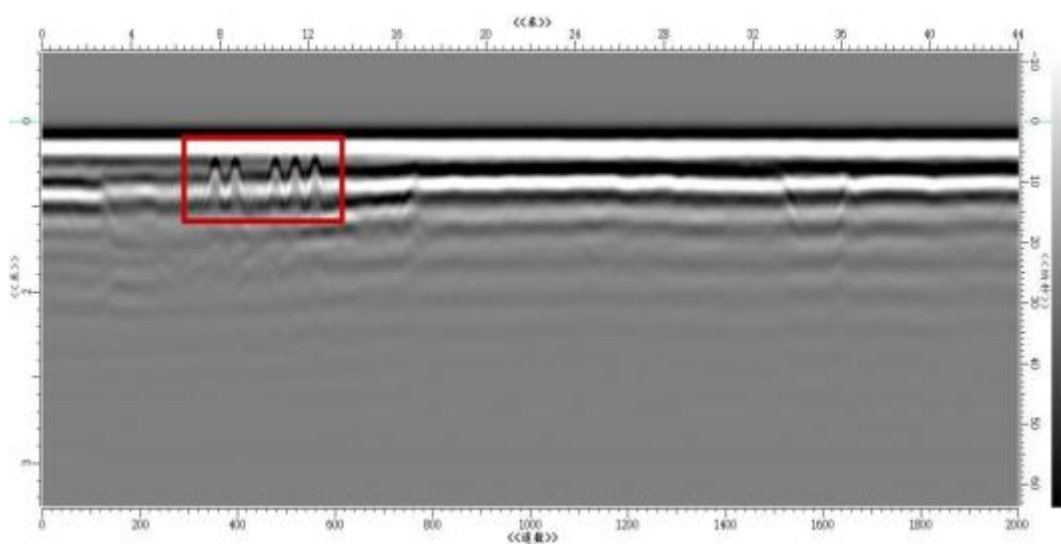


图 C. 4 地下钢筋分布雷达波谱

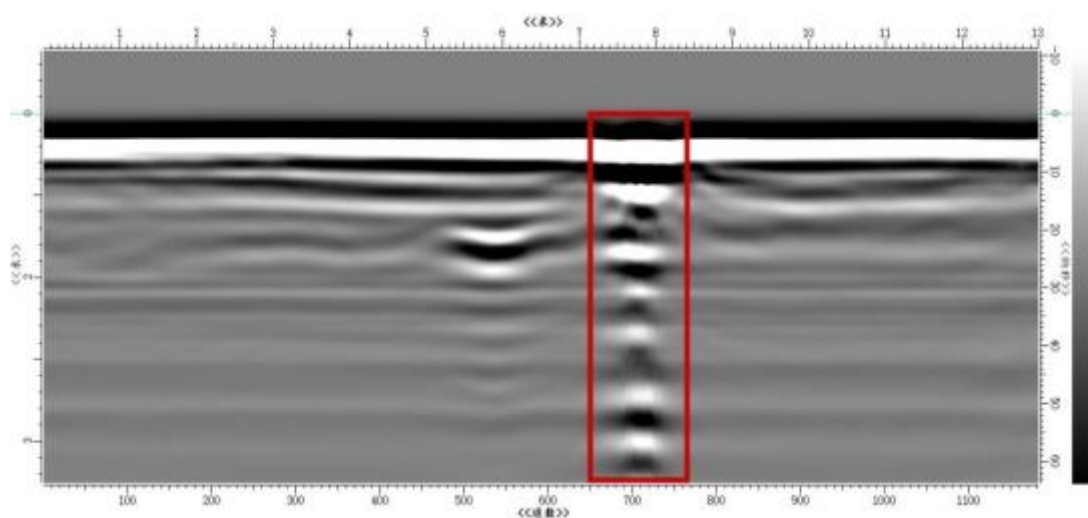


图 C. 5 金属井盖窰井雷达波谱

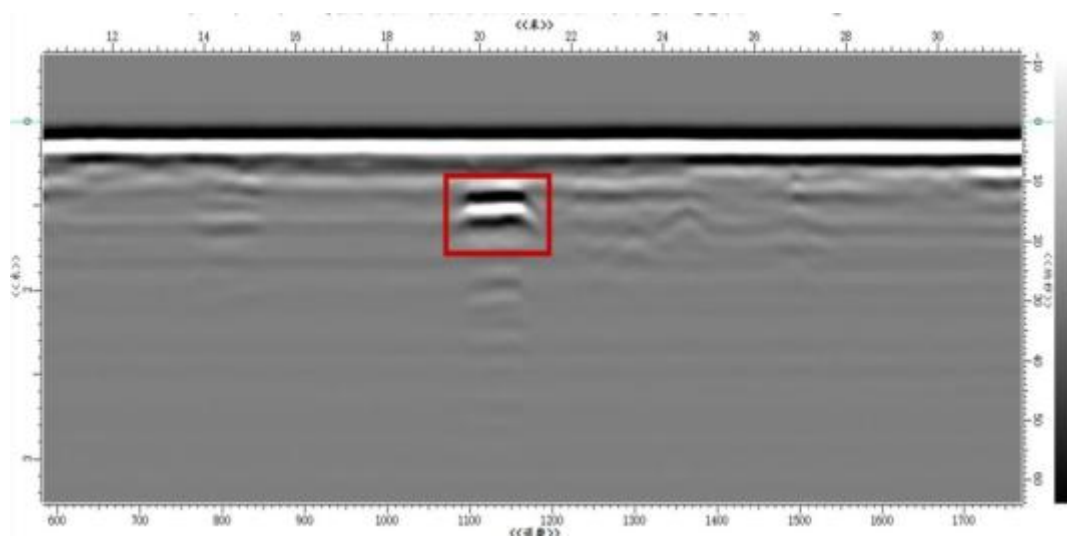


图 C. 6 地下方涵雷达波谱

C. 4 堤防隐患雷达波谱

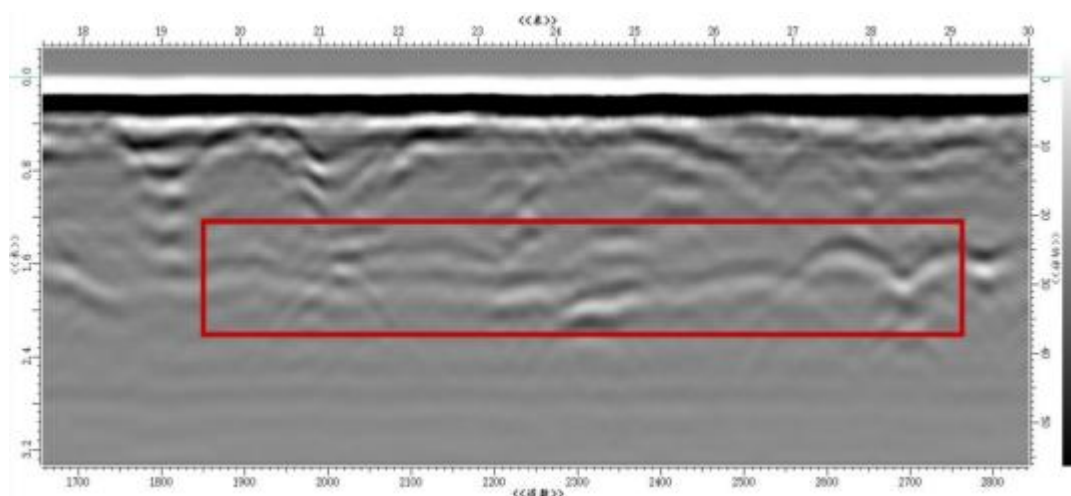


图 C. 7 裂缝雷达波谱

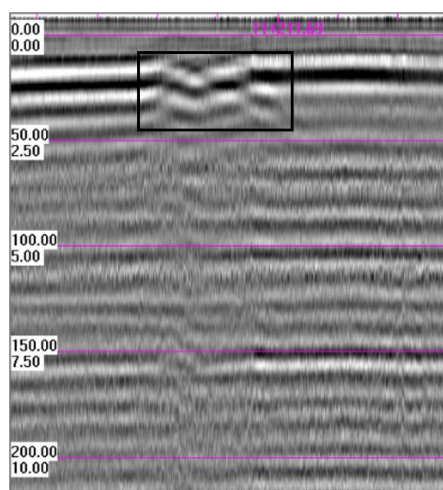


图 C. 8 松软层雷达波谱

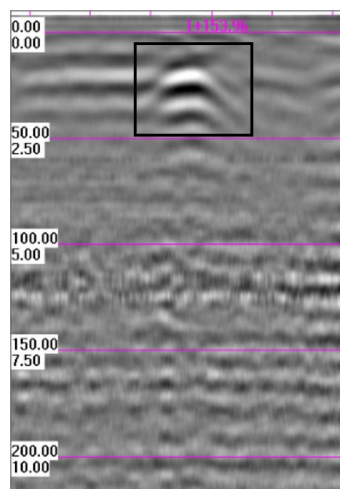


图 C. 9 脱空区雷达波谱

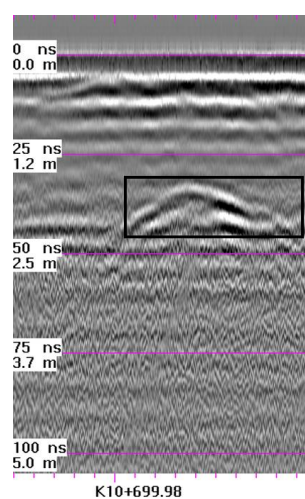


图 C. 10 空洞区雷达波谱

附录 D（资料性附录）典型视电阻率断面图

D.1 地下管线视电阻率断面图

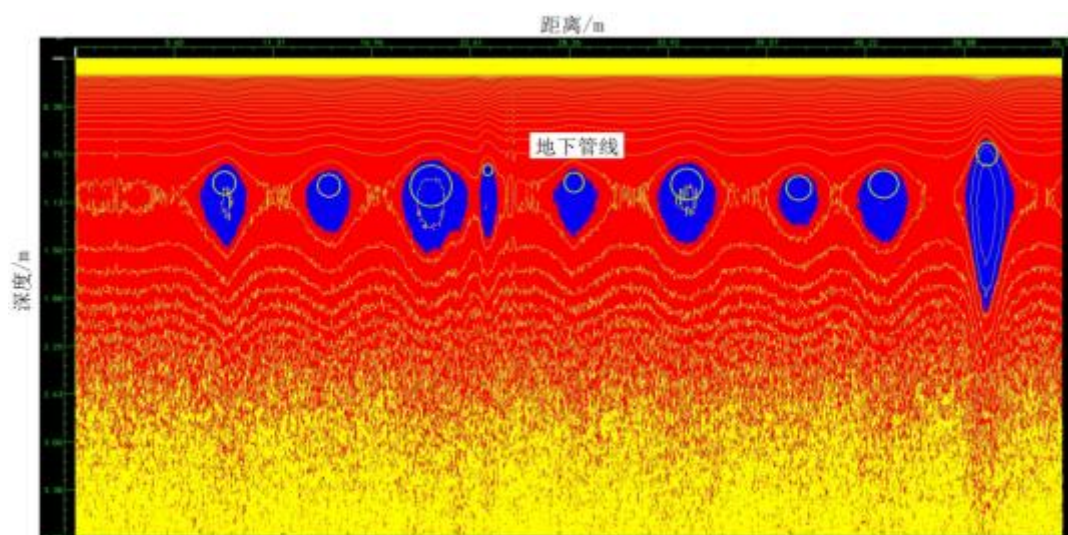


图 D.1 地下管线视电阻率断面

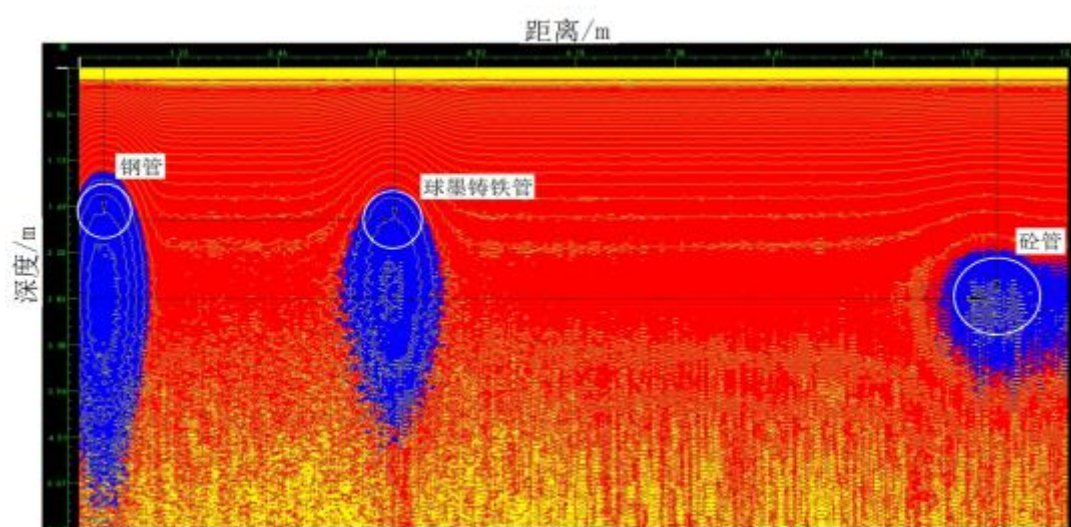


图 D.2 不同材质地下管线视电阻率断面

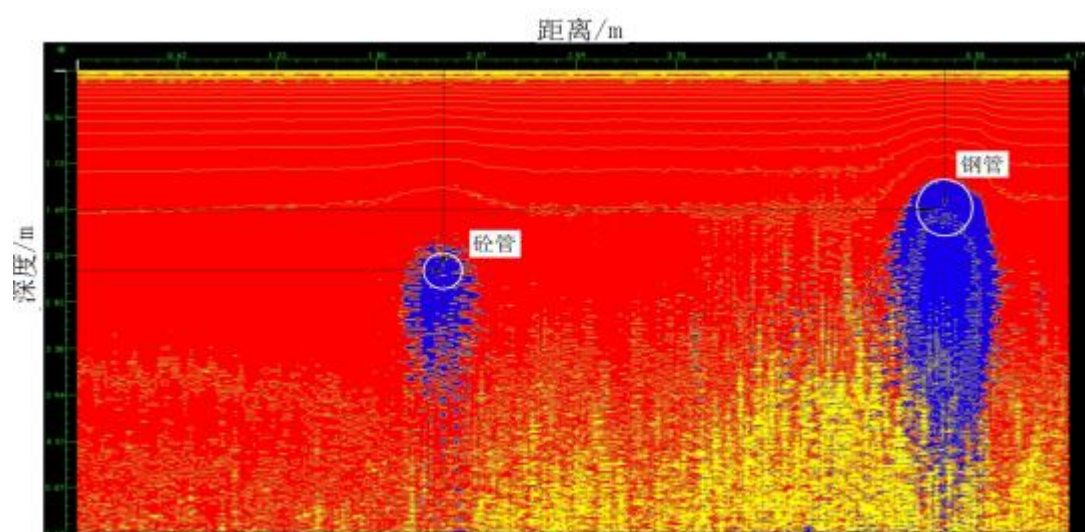


图 D. 3 钢管、混凝土管视电阻率断面

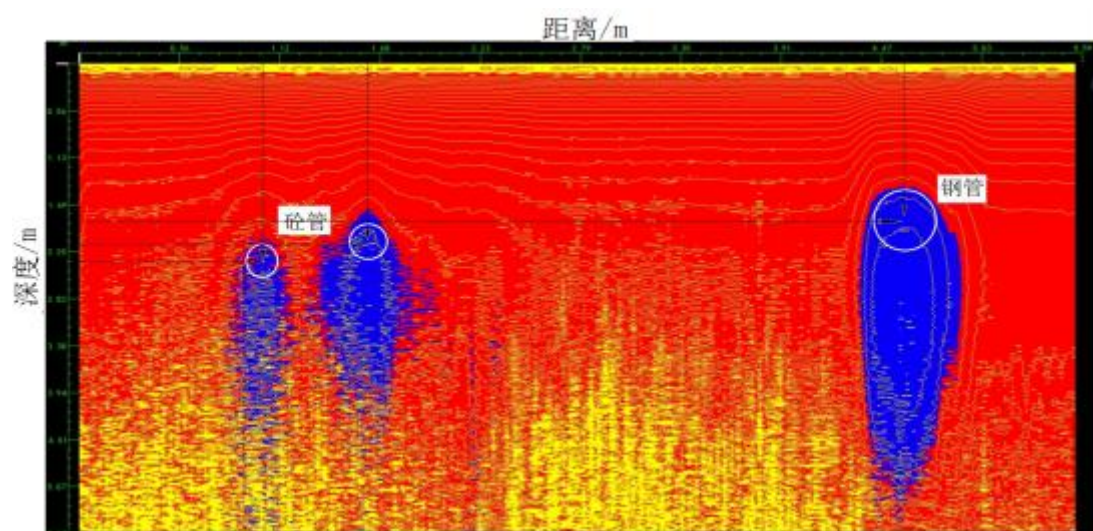


图 D. 4 钢管、混凝土管视电阻率断面

D. 2 地下设施视电阻率断面图

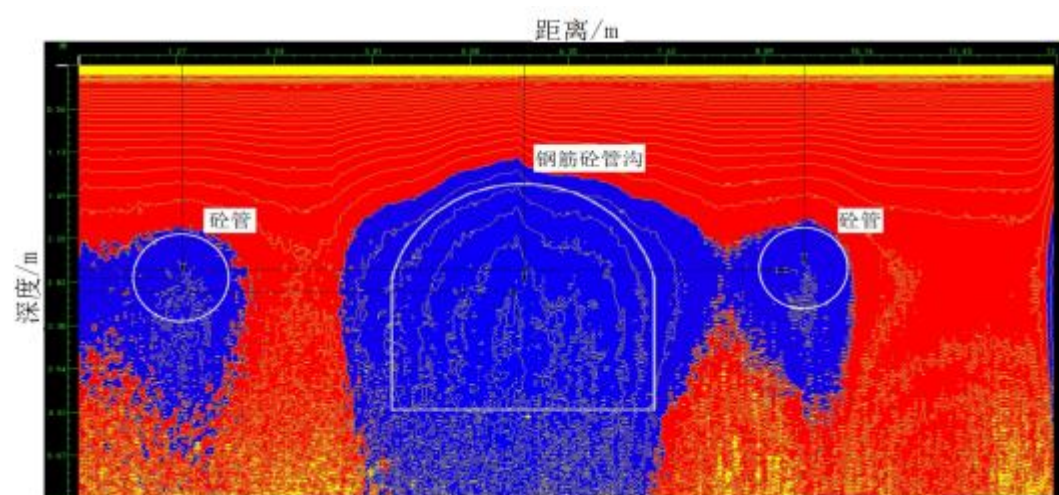


图 D. 5 地下构筑物（管沟）视电阻率断面

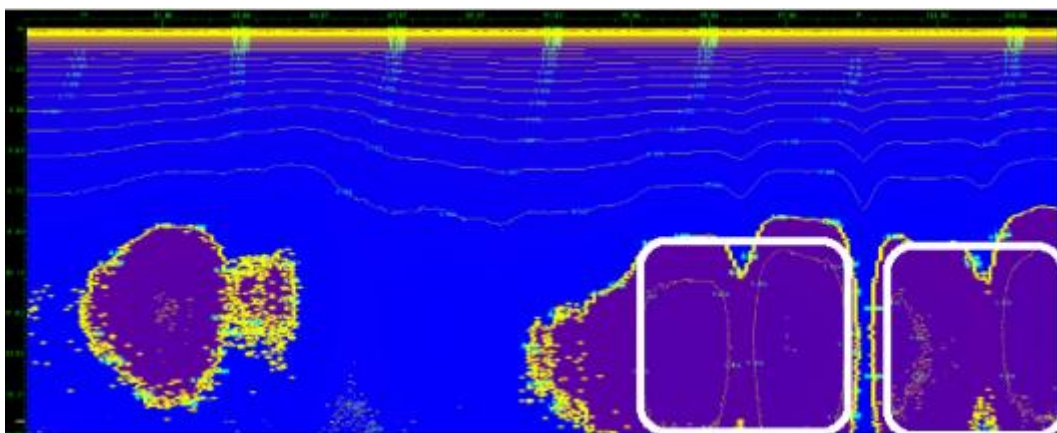


图 D. 6 地下构筑物视电阻率断面

D. 3 隐患视电阻率断面图

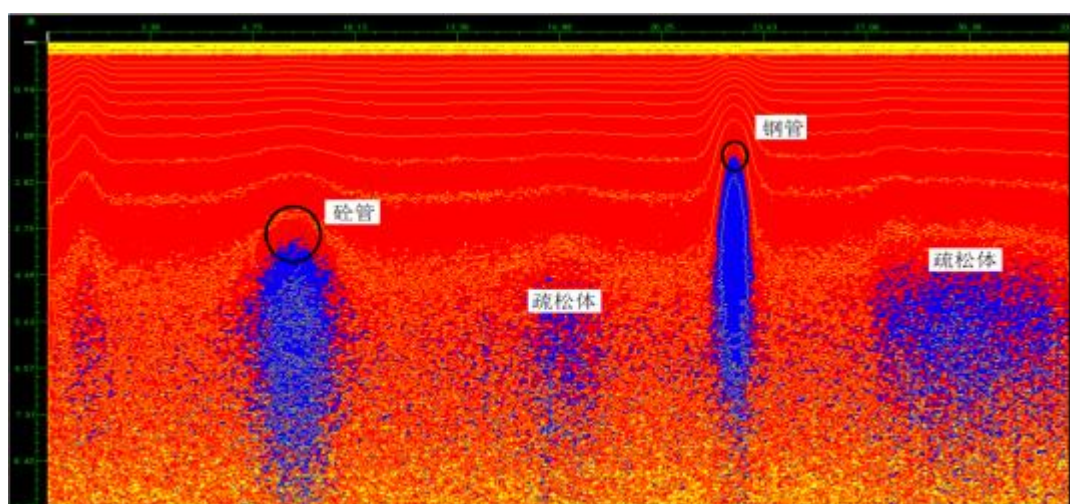


图 D. 7 高含砂层视电阻率断面

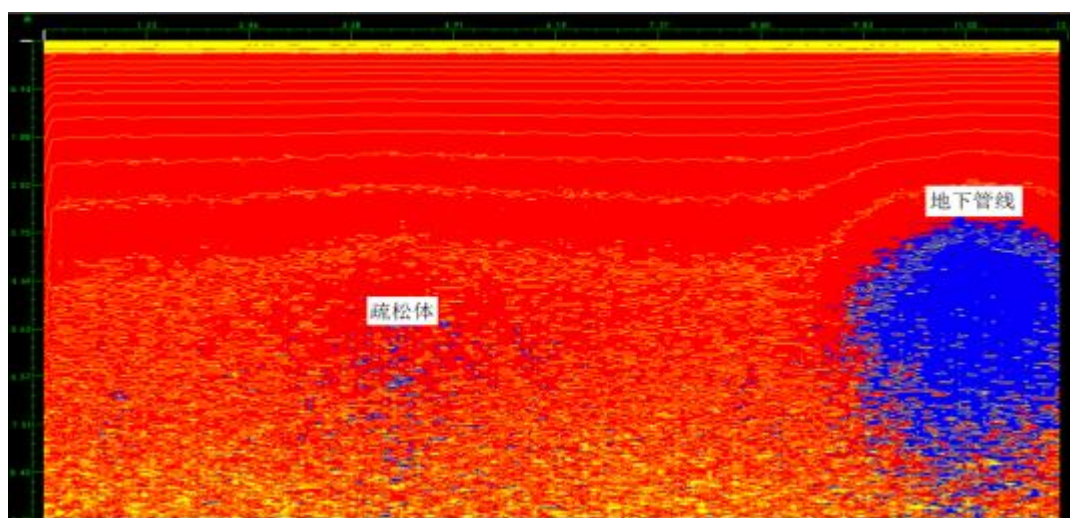


图 D. 8 砂砾石层视电阻率断面

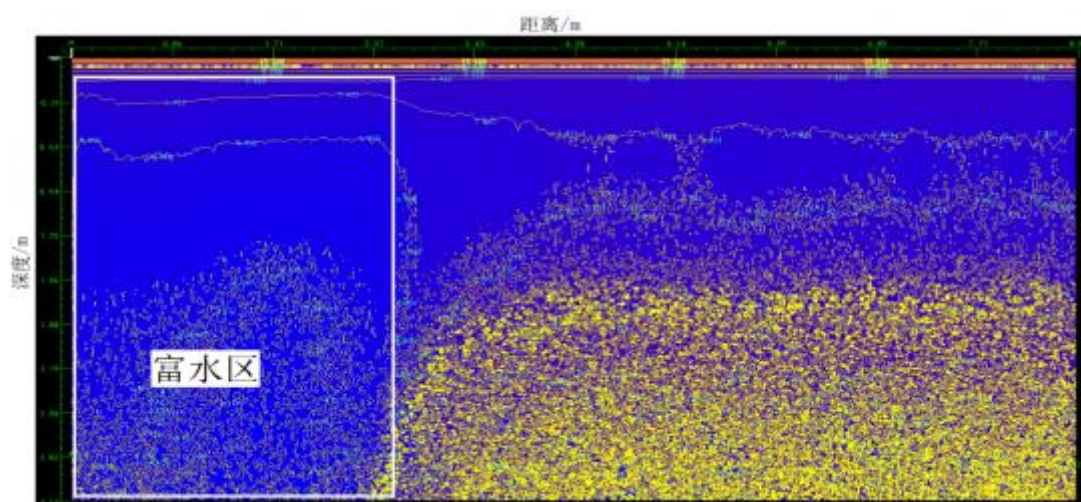


图 D. 9 渗漏视电阻率断面

参考文献

- [1] 《城市道路检测技术规程》（DB 50/T 395-2011）；
- [2] 《道路塌陷隐患雷达检测技术规范》（T/CMEA 2-2018）；
- [3] 《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》（JGJ/T 437-2018）；
- [4] 叶英.《浅层瞬变电磁雷达》，地质出版社，2016 年 12 月。