

团体标准

T/CWDPA XXX—2026

道路及桥梁隧道隐蔽工程无损检测技术规范

Technical specifications for non-destructive testing of concealed works in
roads, bridges, and tunnels
(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本要求 错误！未定义书签。

 4.1 一般原则 错误！未定义书签。

 4.2 单位与人员资质 错误！未定义书签。

 4.3 设备与材料要求 错误！未定义书签。

 4.4 安全与环境要求 错误！未定义书签。

5 泄漏检测技术要求 错误！未定义书签。

 5.1 一般规定 错误！未定义书签。

 5.2 供热管网泄漏检测 错误！未定义书签。

 5.3 燃气管网泄漏检测 错误！未定义书签。

6 漏点定位方法 错误！未定义书签。

 6.1 一般要求 错误！未定义书签。

 6.2 初步筛查 错误！未定义书签。

 6.3 精准探测 错误！未定义书签。

 6.4 燃气管网漏点定位补充要求 错误！未定义书签。

 6.5 供热管网漏点定位补充要求 错误！未定义书签。

 6.6 结果复核 错误！未定义书签。

7 修复工艺要求 错误！未定义书签。

 7.1 一般规定 错误！未定义书签。

 7.2 修复前准备 错误！未定义书签。

 7.3 临时修复 错误！未定义书签。

 7.4 永久修复 错误！未定义书签。

 7.5 燃气管网修复补充要求 错误！未定义书签。

 7.6 供热管网修复补充要求 错误！未定义书签。

8 施工安全防护 错误！未定义书签。

 8.1 一般要求 错误！未定义书签。

 8.2 燃气管网作业安全 错误！未定义书签。

 8.3 供热管网作业安全 错误！未定义书签。

 8.4 有限空间作业 错误！未定义书签。

 8.5 占道施工与夜间作业 错误！未定义书签。

 8.6 特殊天气作业安全 错误！未定义书签。

 8.7 应急准备 错误！未定义书签。

9 验收标准 错误！未定义书签。

 9.1 一般规定 错误！未定义书签。

9.2 燃气管网验收 错误！未定义书签。

9.3 供热管网验收 错误！未定义书签。

9.4 验收资料 错误！未定义书签。

10 运行维护与应急处置 错误！未定义书签。

10.1 修复后管网的运行维护 错误！未定义书签。

10.2 泄漏事故分级 错误！未定义书签。

10.3 应急处置 错误！未定义书签。

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。

本文件由深圳市鑫泰检测有限公司提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

道路及桥梁隧道隐蔽工程无损检测技术规范

1 范围

本文件规定了道路、桥梁、隧道隐蔽工程无损检测的总体检测要求、道路隐蔽工程无损检测、桥梁隐蔽工程无损检测、隧道隐蔽工程无损检测、数据采集处理与数字化成果、缺陷分级判定与检测报告等技术要求。

本文件适用于公路、市政道路、城市桥梁、公路隧道及市政隧道工程中的路基填筑等隐蔽工程的无损检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 12604.2 无损检测 术语 射线照相检测
- GB/T 12604.3 无损检测 术语 渗透检测
- GB/T 12604.6 无损检测 术语 涡流检测
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 12604.2、GB/T 12604.3、GB/T 12604.6界定的及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

隐蔽工程 concealed work

在施工过程中被后续工序覆盖、施工完成后无法直接从外部观察和量测的工程部位，包括路基填筑层、地下管线及管涵、桥梁桩基、预应力管道、隧道衬砌背后及围岩回填等。

3.2

无损检测 non-destructive testing

在不破坏被检测对象完整性的前提下，利用物理或化学方法获取被检测对象内部质量信息的检测技术。

3.3

探地雷达检测 ground penetrating radar testing

利用高频电磁波在地下介质中的传播与反射特性，探测地下目标体或结构层分布的无损检测方法。

3.4

冲击回波法 impact-echo method

通过机械冲击激发应力波在结构中传播，根据应力波在结构表面、内部缺陷及边界处的反射特征，推断结构内部缺陷和厚度的无损检测方法。

3.5

红外热成像检测 infrared thermography testing

通过测量被检测对象表面的热辐射分布，根据温度异常区域推断内部缺陷的无损检测方法。

3.6

低应变完整性检测 low-strain integrity testing

在桩顶施加低能量瞬态激振，通过分析应力波在桩身中的传播与反射特征，判断桩身完整性的无损检测方法。

3.7

多手段协同检测 multi-method collaborative testing

针对同一隐蔽工程对象，采用两种或两种以上无损检测方法进行综合检测，通过相互验证和补充提高检测结果可靠性的作业模式。

3.8

衬砌背后空洞 void behind lining

隧道衬砌与围岩之间因回填不密实或围岩变形形成的未被充填的空隙。

3.9

脱空 debonding

结构层之间因粘结失效形成的局部脱离或空隙现象。

3.10

单道波形 single-channel waveform

探地雷达检测中单个测点位置采集的单一通道的反射波波形数据。

4 总体检测要求

4.1 检测单位与人员

4.1.1 从事道路、桥梁、隧道隐蔽工程无损检测的检测机构应具备相应的检测资质，检测能力应覆盖所申报的检测参数。检测机构应建立完善的质量管理体系，并保持有效运行。

4.1.2 无损检测人员应持有相应检测方法、相应级别的资格证书，并在有效期内。超声检测人员应持有超声检测资格证书，探地雷达检测人员应经过专项培训并考核合格，红外热成像检测人员应经过热成像检测技术专项培训。

4.1.3 检测报告审核人员应具有中级及以上技术职称，签发人员应具有高级及以上技术职称。审核人员和签发人员应具有不少于5年的相关检测工作经验。

4.1.4 检测机构应定期组织检测人员进行技术培训和能力比对，确保检测人员的持续胜任能力。

4.2 仪器设备

4.2.1 检测用仪器设备应经计量检定或校准合格，并在有效期内使用。仪器设备的检定或校准周期应不超过12个月。

4.2.2 探地雷达、超声检测仪、冲击回波仪、红外热成像仪、低应变检测仪等核心设备应每年进行一次全面标定，标定记录应完整保存。

4.2.3 现场检测前应对仪器设备进行功能检查和参数验证，确认设备处于正常状态。仪器设备的检查应包括电源、信号线、探头、数据采集软件和存储介质等。

4.2.4 探地雷达的天线在每次检测前应在已知厚度或已知目标体位置进行系统校准，校准结果应记录在案。

4.2.5 仪器设备在运输和储存过程中应做好防震、防潮、防尘措施。发现设备异常时，应立即停止使用并进行检修。

4.3 检测方案编制

4.3.1 检测实施前应编制检测方案，方案内容应包括下列内容：

- a) 工程概况和检测依据；
- b) 检测范围和检测项目；
- c) 检测方法选择和测线测点布置；
- d) 仪器设备配置及标定记录；
- e) 现场作业条件和安全措施；
- f) 数据处理方法和缺陷判定标准；
- g) 检测进度和人员安排。

- 4.3.2 检测方案编制前应收集工程设计文件、施工记录、地质勘察报告等相关资料，充分了解工程结构和地质条件。
- 4.3.3 检测方法的选用应根据检测目的、被检测对象的材质、结构形式、可操作性以及现场条件综合确定，宜采用两种及以上方法进行相互验证。
- 4.3.4 测线和测点的布置应在检测方案中明确标注，布置图应清晰标示测线位置、测点编号和检测方向。
- 4.3.5 检测方案应经技术负责人审批后实施，方案变更应重新审批。方案变更涉及检测方法、测线布置或判定标准时，应重新进行审批。

4.4 检测环境条件

- 4.4.1 现场检测应在适宜的环境条件下进行。环境温度宜为 5℃至 40℃，检测环境温度变化应不超过 10℃/h。
- 4.4.2 雨雪天气应不进行室外检测作业。检测表面应保持干燥，积水或覆冰时应先进行清理并等待表面干燥后再行检测。
- 4.4.3 强电磁干扰环境下的雷达检测应采取屏蔽措施或选择电磁干扰较弱的时段进行。检测区域周边应不有大功率无线电发射设备运行。
- 4.4.4 红外热成像检测应避免在阳光直射、强风或降雨条件下进行。检测宜在夜间或阴天进行，以减少环境温度波动对检测结果的影响。
- 4.4.5 隧道内检测应保证充足的照明和通风条件。隧道内空气含氧量应不低于 19.5%，有害气体浓度应不超出相关安全标准的规定。

4.5 安全作业

- 4.5.1 检测前应确认检测区域处于安全状态，采取必要的安全防护措施。检测区域应设置明显的安全警示标志。
- 4.5.2 高处作业、临边作业应配备安全防护装备，作业人员应佩戴安全帽、安全带，并符合相关安全作业规定。
- 4.5.3 隧道内检测应配备通风照明设备，检测人员应佩戴符合要求的个人防护用品，包括防尘口罩、安全鞋和反光背心。
- 4.5.4 交通通行区域检测应设置交通引导和警示设施，检测人员应穿戴高可视警示服装。检测时段应尽量避免交通高峰时段。

5 道路隐蔽工程无损检测

5.1 一般要求

- 5.1.1 道路隐蔽工程无损检测应包括路基填筑质量、地下管线及管涵、路面结构层厚度、路面基层脱空及地下空洞等检测项目。
- 5.1.2 道路隐蔽工程检测应以探地雷达法为主要检测手段，必要时辅以钻芯验证。探地雷达检测应选用合适中心频率的天线，天线频率的选择应根据探测深度和分辨率要求综合确定。
- 5.1.3 道路检测应按先普查后详查的原则进行。普查应覆盖全部检测路段，详查应对普查发现的异常区域进行加密测线和交叉验证。
- 5.1.4 检测前应收集道路设计图纸、施工资料和地质勘察报告，了解道路结构层设计厚度、材料类型和地下管线布置情况。

5.2 路基填筑质量检测

- 5.2.1 路基填筑质量检测应包括填料均匀性、压实度分布、软弱夹层及含水率异常区域等内容。
- 5.2.2 探地雷达检测应选用中心频率为 100MHz 至 400MHz 的屏蔽天线。当探测深度大于 5m 时，宜选用 100MHz 天线；当探测深度为 3m 至 5m 时，宜选用 200MHz 天线；当探测深度小于 3m 时，宜选用 400MHz 天线。
- 5.2.3 测线应沿路基纵向布置，测线间距宜为 2m 至 5m。路基宽度小于 10m 时，应不少于 3 条纵向测

线，分别布置于路基中心和左右两侧；路基宽度大于等于 10m 时，纵向测线间距应不大于 5m。

5.2.4 数据采集时天线移动速度应均匀，速度不宜大于 5km/h。每 100m 检测长度应记录不少于一个里程桩号标记。

5.2.5 雷达数据中出现反射界面错断、同相轴扭曲或振幅突变等异常特征时，应标记为可疑区域。

5.2.6 对可疑区域应采用钻芯法进行验证。验证孔位应不少于可疑区域数量的 10%，且每个标段应不少于 3 个验证孔。验证芯样应进行描述和拍照，并记录芯样的分层厚度和填料类型。

5.3 地下管线及管涵检测

5.3.1 地下管线及管涵检测应包括管线位置、埋深、管径及周边土体密实状态等内容。

5.3.2 检测应选用中心频率为 400MHz 至 900MHz 的高频天线。当管线埋深小于 1.5m 时，宜选用 900MHz 天线；当管线埋深为 1.5m 至 3.0m 时，宜选用 400MHz 天线。

5.3.3 测线应垂直于管线走向布置，测线间距宜为 0.5m 至 1.0m。探测区域内的测线总长度应能覆盖全部待检测管路段。

5.3.4 管线平面位置的定位误差应不超过 0.2m，埋深误差应不超过 0.1m。定位时应在地面做出明确标记，并记录管线里程桩号和平面坐标。

5.3.5 雷达图像中管线目标体应呈现双曲线形态反射信号，根据双曲线顶点位置确定管线平面位置，根据反射波双程走时计算管线埋深。

5.3.6 管线周围出现连续或不连续的强反射区域时，应判定为土体疏松或空洞。对于判定为土体疏松或空洞的区域，宜采用钻探或开挖方式进行验证。

5.4 路面结构层厚度检测

5.4.1 路面结构层厚度检测应包括面层厚度、基层厚度和底基层厚度。

5.4.2 检测应选用中心频率为 900MHz 至 1500MHz 的高频屏蔽天线。当设计厚度小于 0.1m 时，宜选用 1500MHz 天线；当设计厚度为 0.1m 至 0.3m 时，宜选用 900MHz 天线。

5.4.3 测线应沿行车方向布置，每车道应不少于 1 条测线。测线长度应覆盖全部检测段落。

5.4.4 每个检测段落应不少于 5 个厚度计算点，计算点应均匀分布于检测段落内。

5.4.5 厚度实测值与设计值的偏差超过设计厚度 15% 时，应判定为厚度不合格。

5.5 路面基层脱空与地下空洞检测

5.5.1 路面基层脱空检测应选用中心频率为 100MHz 至 400MHz 的屏蔽天线。沿行车道方向按纵向测线布置，测线间距不宜大于 2m。

5.5.2 地下空洞检测应在疑似空洞区域采用网格状加密测线进行详查，网格尺寸不宜大于 0.5m×0.5m。

5.5.3 探地雷达图像中出现下列特征之一时，应标记为疑似脱空或空洞区域：

- a) 强振幅反射界面，反射信号强度明显高于周边区域；
- b) 多次反射波，反射波重复出现三次及以上；
- c) 双曲线形态反射信号，且双曲线顶部出现相位反转；
- d) 下部反射信号明显减弱或消失。

疑似脱空或空洞区域的判定应结合道路技术状况、交通荷载历史和维护记录进行综合判断。

疑似脱空或空洞区域应采用钻芯法进行验证。验证孔位应不少于疑似区域数量的 10%，且每个标段应不少于 3 个验证孔。验证芯样应记录芯样的完整性和脱空位置。

5.6 道路多方法协同检测

5.6.1 道路隐蔽工程检测应以探地雷达法进行普查，测线应覆盖全部检测区域。普查完成后应编制普查成果图，标示全部疑似异常区域。

5.6.2 对探地雷达普查发现的疑似脱空、空洞等异常区域，应采用钻芯法进行验证。钻芯验证应采集不少于 3 个芯样。

5.6.3 钻芯验证的芯样应进行描述和拍照，芯样照片应作为检测报告的附件。验证结论与雷达检测结论不一致时，应以钻芯验证结论为准。

5.6.4 对于地下管线或空洞分布复杂的区域，可在钻芯验证基础上补充采用跨孔雷达或地震波层析成像方法进行详查。

6 桥梁隐蔽工程无损检测

6.1 一般要求

6.1.1 桥梁隐蔽工程无损检测应包括桥梁桩基完整性、箱梁内部空洞、预应力管道压浆密实度及钢筋保护层厚度等检测项目。

6.1.2 检测方法应根据检测对象、结构形式和检测目的综合确定。桥梁隐蔽工程检测应先进行无损普查，对普查发现的异常区域进行详查验证。

6.1.3 检测前应收集桥梁设计图纸、施工记录和养护资料，了解桥梁结构形式、桩基类型、预应力布置情况和钢筋配置信息。

6.2 桩基完整性检测

6.2.1 桩基完整性检测应采用低应变反射波法进行普查。

6.2.2 低应变检测应在桩顶表面清理干净后进行。桩顶应打磨平整，传感器安装位置应无浮浆、无积水、无杂物。传感器应耦合良好，耦合剂应选用专用耦合材料。

6.2.3 传感器应安装于桩顶中心或距中心 2/3 半径处，激振点应布置在距传感器 200mm 至 300mm 处。对于大直径桩（直径大于 1.5m），应布置不少于 4 个测点。

6.2.4 激振应采用专用手锤或力棒，激振力的大小和方向应保持一致。每根桩应采集不少于 3 条有效波形曲线，波形应清晰显示桩底反射信号。

6.2.5 有效波形应符合下列要求：

- a) 波形起点清晰，首波幅值适中；
- b) 波形尾部回归基线，无异常漂移；
- c) 桩底反射信号可辨识，反射波到达时间稳定；
- d) 各条波形的一致性良好，变异系数应不超过 15%。

6.2.6 桩身完整性类别应按下列规定划分：

- a) I 类桩：桩身完整，波形规则，桩底反射清晰，波速正常；
- b) II 类桩：桩身存在轻微缺陷，波形有局部异常，但不影响桩身结构承载力；
- c) III 类桩：桩身存在明显缺陷，波形异常明显，对桩身结构承载力有影响；
- d) IV 类桩：桩身存在严重缺陷或断桩。

6.2.7 对低应变检测判定为 III 类或 IV 类的桩基，应采用钻芯法或声波透射法进行验证检测。钻芯法验证应全桩长取芯，芯样应进行抗压强度试验。

6.3 箱梁内部空洞检测

6.3.1 箱梁内部空洞检测应采用冲击回波法或探地雷达法。

6.3.2 冲击回波检测时，冲击点应布置在箱梁底板和腹板表面，测点应沿箱梁纵向和横向均匀布置，测点间距不宜大于 0.3m。每个检测区域应不少于 5 条测线。

6.3.3 冲击回波检测应采用钢球或电磁冲击器产生冲击波，冲击能量应保持一致。冲击回波信号应采集不少于 5 次有效冲击，取平均值进行分析。

6.3.4 探地雷达检测应选用中心频率为 900MHz 至 1500MHz 的天线，沿箱梁纵向布置测线，测线间距不宜大于 0.2m。测线应覆盖箱梁底板全宽。

6.3.5 厚度实测值与设计值偏差超过设计厚度 10% 的区域，应标记为厚度异常区域。厚度异常区域应采用钻芯法进行验证。

6.4 预应力管道压浆密实度检测

6.4.1 预应力管道压浆密实度检测应采用冲击回波法或探地雷达法。

6.4.2 检测应覆盖全部预应力管道，每条管道的检测测点不应少于 5 个。测点应沿管道长度方向均匀布置，测点间距应不大于 2m。

6.4.3 冲击回波检测时，冲击点应布置在管道正上方，冲击信号应能有效反映管道内部状态。

6.4.4 压浆密实度判定应符合下列规定：

- a) 密实：波形正常，无异常反射，厚度频率峰值清晰；

- b) 基本密实：存在局部轻微不密实，波形有小幅异常，但不影响结构安全；
- c) 不密实：存在明显空洞或不密实区域，波形出现显著异常反射。

6.4.5 判定为不密实的管道应进行补充压浆处理。补充压浆完成后应重新进行检测，确认压浆密实度达标。

6.4.6 探地雷达检测压浆密实度时，雷达图像中管道位置出现强反射信号或多次反射信号时，应标记为不密实区域。

6.5 钢筋保护层厚度检测

6.5.1 钢筋保护层厚度检测应采用钢筋探测仪或探地雷达法。

6.5.2 检测应按构件类型分别进行，每类构件的检测数量不应少于构件总数的 10%，且不应少于 3 件。检测应覆盖构件的不同部位，包括支座附近、跨中部位和锚固区域。

6.5.3 钢筋探测仪使用前应在已知厚度试块上进行标定，标定误差应不超过 1mm。

6.5.4 保护层厚度实测值与设计值的偏差超过 GB 50204 规定的允许偏差时，应判定为不合格。对于判定为不合格的部位，应加密检测点进行复测确认。

6.6 桥梁多方法协同检测

6.6.1 桥梁桩基检测应以低应变法进行普查，对普查结果异常的桩基应采用钻芯法或声波透射法进行详查。声波透射法检测应预埋声测管，检测时应采集不少于 3 对声测管的声波数据。

6.6.2 箱梁和预应力管道检测应以冲击回波法或探地雷达法进行普查，对普查发现的异常区域应采用钻芯法进行验证。钻芯验证的位置应避开预应力管道和钢筋密集区域。

6.6.3 钻芯验证的芯样应进行抗压强度试验，试验结果应与无损检测结果进行比对分析。抗压强度低于设计强度 85% 时，应判定为结构质量不合格。

6.6.4 钢筋保护层厚度检测结果与设计不符时，应采用局部破损法进行验证。局部破损法应在不损伤结构受力钢筋的前提下进行。

7 隧道隐蔽工程无损检测

7.1 一般要求

7.1.1 隧道隐蔽工程无损检测应包括隧道衬砌厚度、衬砌背后回填空洞、围岩裂隙及防水层脱空等检测项目。

7.1.2 隧道隐蔽工程检测应采用探地雷达法进行普查，采用钻芯法或 CT 扫描法进行验证。检测应覆盖隧道全长的拱顶、拱腰和边墙部位。

7.1.3 检测前应收集隧道设计图纸、地质勘察报告和施工记录，了解隧道围岩等级、衬砌设计厚度和防水层设置情况。

7.2 衬砌厚度检测

7.2.1 衬砌厚度检测应采用探地雷达法。

7.2.2 检测应选用中心频率为 400MHz 至 900MHz 的屏蔽天线。对于衬砌厚度小于 0.3m 的隧道，宜选用 900MHz 天线；对于衬砌厚度大于等于 0.3m 的隧道，宜选用 400MHz 天线。

7.2.3 测线应沿隧道纵向布置，拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙和右边墙部位应分别布置测线。纵向测线间距不宜大于 5m，每 100m 隧道长度应不少于 20 条横向检测断面。

7.2.4 每个检测断面应不少于 5 个测点，分别位于拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙和右边墙。测点应均匀分布在断面圆周上。

7.2.5 衬砌厚度实测值低于设计值，且偏差超过设计厚度 10% 时，应判定为厚度不足。厚度不足段落的长度累计超过该检测段落长度 10% 时，该段落应判定为衬砌厚度不合格。

7.2.6 衬砌厚度不足的段落应采用钻芯法进行验证。验证芯样的数量应不少于厚度不足段落数量的 10%，且每个隧道应不少于 5 个验证孔。

7.3 衬砌背后回填空洞检测

- 7.3.1 衬砌背后回填空洞检测应采用探地雷达法，必要时辅以钻芯验证。
- 7.3.2 雷达检测应选用中心频率为 100MHz 至 400MHz 的天线，沿隧道纵向和环向分别布置测线。纵向测线间距应不大于 5m，环向测线间距应不大于 3m。
- 7.3.3 雷达图像中出现下列特征之一时，应标记为疑似空洞区域：
- a) 强反射信号，反射波振幅显著高于周边区域；
 - b) 多次反射波，反射波重复出现多次；
 - c) 绕射波信号，呈现双曲线或半双曲线形态；
 - d) 衬砌与围岩界面反射信号消失或严重畸变。
- 7.3.4 疑似空洞区域应采用钻芯法进行验证。验证孔位应不少于疑似区域数量的 20%，且每个隧道应不少于 3 个验证孔。
- 7.3.5 空洞深度大于 0.1m 时，应判定为需处理空洞。空洞处理应采用注浆填充方式，注浆完成后应重新进行检测验证。

7.4 防水层脱空检测

- 7.4.1 防水层脱空检测应采用红外热成像法或探地雷达法。
- 7.4.2 红外热成像检测应在衬砌表面温度稳定条件下进行。宜在无阳光直射的时段进行检测，宜在夜间或阴天进行。检测前应在检测区域设置温度参考点。
- 7.4.3 红外热成像检测时，红外热像仪应垂直于检测表面，拍摄距离宜为 1m 至 5m。每幅热像图应覆盖不少于 1m² 的检测面积。
- 7.4.4 温度异常区域与周边正常区域温差大于 1℃ 时，应标记为疑似脱空区域。温差大于 3℃ 时，应判定为明显脱空区域。
- 7.4.5 疑似脱空区域应采用敲击法或钻芯法进行验证。敲击法检测应在脱空区域边界加密测点，确定脱空范围。钻芯法验证应在脱空区域中心位置取芯，芯样应记录脱空层位和脱空厚度。

7.5 围岩裂隙检测

- 7.5.1 围岩裂隙检测应采用探地雷达法或地震波法。
- 7.5.2 探地雷达检测应选用中心频率为 100MHz 的天线，测线应沿隧道纵向和环向布置。测线间距应不大于 10m。
- 7.5.3 雷达图像中围岩出现连续反射界面错断、同相轴不连续或信号衰减异常时，应标记为裂隙发育区域。
- 7.5.4 裂隙发育区域应结合地质勘察报告和施工记录进行综合判定。裂隙发育程度影响隧道结构安全时，应提出专项处理建议。

7.6 隧道多方法协同检测

- 7.6.1 隧道衬砌检测应以探地雷达法进行普查，沿隧道纵向和环向布置测线，普查应覆盖全部检测段落。
- 7.6.2 对普查发现的衬砌厚度不足、背后空洞等异常区域，应采用钻芯法进行验证。钻芯验证的芯样应记录衬砌分层厚度、空洞位置和围岩接触情况。
- 7.6.3 防水层脱空检测应以红外热成像法进行普查，对普查发现的温度异常区域应采用敲击法或钻芯法进行验证。敲击法检测网格尺寸应不大于 0.2m×0.2m。
- 7.6.4 围岩裂隙检测宜采用探地雷达法与地震波法相互验证。两种方法检测结论不一致时，应补充钻探验证。

8 数据采集、处理与数字化成果

8.1 一般要求

- 8.1.1 现场数据采集应按照检测方案确定的参数和方法进行，采集过程应完整记录。采集人员应按操作手册规定的流程操作，不应随意变更采集参数。
- 8.1.2 数据采集过程中应实时监控数据质量，发现异常时应立即停止采集并查明原因。异常原因排除

后方可继续采集。

8.1.3 数据采集完成后应及时进行备份，原始数据应存储于至少两个独立的存储介质中。

8.2 采样参数

8.2.1 探地雷达检测的采样频率应不低于天线中心频率的 10 倍。时窗长度应满足最大探测深度的要求。

8.2.2 探地雷达检测的测点间距应不大于 0.05m。连续采集时天线移动速度应均匀，速度变化应不超过 10%，移动速度宜不大于 5km/h。

8.2.3 冲击回波检测的采样频率应不低于 1MHz，采样点数应不少于 1024 点。每次冲击应采集不少于 5 次有效信号。

8.2.4 低应变检测的采样频率应不低于 10kHz，采样点数应不少于 1024 点。每根桩应采集不少于 3 条有效波形。

8.2.5 红外热成像检测的空间分辨率应不低于 0.01m，温度分辨率应不低于 0.1℃。每幅热像图的像素应不低于 320×240。

8.3 数据质量要求

8.3.1 探地雷达采集的数据应信噪比良好，目标体反射信号清晰可辨。信号动态范围应不低于 60dB。

8.3.2 冲击回波采集的波形应信噪比良好，厚度共振频率峰值清晰。波形尾部应回归基线，无异常漂移。

8.3.3 低应变采集的波形应完整显示桩底反射，波形尾部应回归基线。波形的首波幅值应适中，不应削峰。

8.3.4 数据质量不满足下列任一要求时，应重新采集：

- a) 信号明显受到外界干扰且无法通过滤波有效去除；
- b) 目标体反射信号不可辨识；
- c) 波形畸变严重，无法用于分析。

8.4 数据处理

8.4.1 探地雷达数据处理应包括下列步骤：

- a) 零时校正：将波形起始点校正至时间零点；
- b) 滤波去噪：采用带通滤波去除低频和高频噪声；
- c) 增益调整：采用时间增益补偿信号衰减；
- d) 背景去除：去除背景杂波干扰；
- e) 偏移处理：将倾斜反射界面归位至真实位置。

8.4.2 冲击回波数据处理应通过快速傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，提取厚度共振频率。

8.4.3 低应变数据处理应进行下列操作：

- a) 指数放大：对波形进行指数放大以补偿能量衰减；
- b) 滤波处理：采用低通滤波去除高频噪声；
- c) 时域分析：识别桩底反射和缺陷反射信号；
- d) 波速计算：根据桩长和桩底反射走时计算桩身波速。

8.4.4 数值修约应符合下列规定：

- a) 厚度、尺寸类数据保留至小数点后一位；
- b) 百分比类数据保留至小数点后一位；
- c) 频率类数据保留至小数点后两位；
- d) 深度类数据保留至小数点后两位；
- e) 力值类数据保留至整数位。

8.5 异常数据的处理

8.5.1 明显偏离合理范围的测量值应标记为异常值。合理范围的确定应依据同类结构的典型值和工程经验。

8.5.2 异常值应通过重复测量或交叉验证确认。重复测量应在同一测点进行不少于 3 次。

8.5.3 经确认的异常值应在报告中注明，并分析可能的原因。异常值不应随意剔除，应保留原始记录。

8.6 数字化成果

8.6.1 检测成果应以数字化形式保存和管理，确保数据的完整性、可追溯性和长期可用性。

8.6.2 数字化成果应包括下列内容：

- a) 原始数据文件；
- b) 处理后的数据文件；
- c) 缺陷分布图（含 GIS 定位信息或里程桩号定位信息）；
- d) 典型图谱及影像资料；
- e) 检测报告电子版。

8.6.3 原始数据应完整保存，不得修改或删除。原始数据存储格式应采用通用格式或设备专用格式，并附有读取说明。

8.6.4 原始数据的保存期限应不少于工程设计使用年限，且不少于 20 年。

8.6.5 检测发现的隐蔽缺陷应采用 GPS 或全站仪进行精确定位，定位精度应不低于 0.1m。定位坐标应采用国家大地坐标系统。

8.6.6 缺陷位置应在工程平面图或断面图上标注，并附缺陷照片或影像资料。缺陷图示应清晰标注缺陷类型、尺寸、深度和里程桩号。

8.6.7 检测过程中的关键工序和缺陷部位应进行拍照或录像。影像资料应清晰可辨，并附有拍摄位置、拍摄方向和拍摄时间的说明。

8.6.8 数字化交付的文件格式应采用通用格式，确保在不同平台上可正常读取。宜采用 PDF、JPEG、BMP、ASCII 等通用格式。

8.6.9 检测成果的数字化交付应附带数据说明文件，包括数据结构、参数定义和读取方法。

9 缺陷分级判定与检测报告

9.1 一般要求

9.1.1 隐蔽缺陷应按其对结构安全和使用性能的影响程度进行分级判定。缺陷分级应依据检测数据、设计要求和相关标准综合确定。

9.1.2 同一检测对象存在多项缺陷时，应综合评定其整体质量等级。综合等级应以最严重的单项缺陷等级为准，同时考虑缺陷的累积效应。

9.1.3 缺陷等级的判定应由具有中级及以上技术职称的检测人员负责。

9.2 缺陷等级划分

9.2.1 隐蔽缺陷等级应按表 1 的规定划分。

表 1 隐蔽缺陷等级划分

等级	名称	判定标准	处置建议
I 级	轻微缺陷	缺陷轻微，不影响结构安全和使用性能	正常使用，可不予处理
II 级	一般缺陷	存在缺陷但不影响结构安全，对使用性能有一定影响	应加强监测，适时处理
III 级	严重缺陷	缺陷明显，对结构安全有潜在影响	应制定处理方案并限期处理
IV 级	危急缺陷	缺陷严重，已影响结构安全	应立即停工，组织专项评估和加固处理

9.2.2 道路隐蔽工程缺陷的分级判定应符合表 2 的规定。

表 2 道路隐蔽工程缺陷分级判定

缺陷类型	I级（轻微）	II级（一般）	III级（严重）	IV级（危急）
路基空洞尺寸	无空洞	直径 $\leq 0.5\text{m}$	直径 $0.5\text{m} \sim 1.0\text{m}$	直径 $> 1.0\text{m}$
基层脱空面积	无脱空	面积 $\leq 1\text{m}^2$	面积 $1\text{m}^2 \sim 3\text{m}^2$	面积 $> 3\text{m}^2$
路面结构层厚度偏差	$>$ 设计值5%	设计值5% $\sim 10\%$	设计值10% $\sim 15\%$	$>$ 设计值15%

9.2.3 桥梁隐蔽工程缺陷的分级判定应符合表3的规定。

表3 桥梁隐蔽工程缺陷分级判定

缺陷类型	I级（轻微）	II级（一般）	III级（严重）	IV级（危急）
桩基完整性类别	I类	II类	III类	IV类
预应力管道压浆	密实	基本密实	不密实	严重不密实
钢筋保护层厚度偏差	$>$ 设计值10%	设计值10% $\sim 20\%$	设计值20% $\sim 30\%$	$>$ 设计值30%

9.2.4 隧道隐蔽工程缺陷的分级判定应符合表4的规定。

表4 隧道隐蔽工程缺陷分级判定

缺陷类型	I级（轻微）	II级（一般）	III级（严重）	IV级（危急）
衬砌厚度偏差	$>$ 设计值5%	设计值5% $\sim 10\%$	设计值10% $\sim 15\%$	$>$ 设计值15%
衬砌背后空洞尺寸	无空洞	深度 $\leq 0.1\text{m}$	深度 $0.1\text{m} \sim 0.3\text{m}$	深度 $> 0.3\text{m}$
防水层脱空面积	无脱空	面积 $\leq 1\text{m}^2$	面积 $1\text{m}^2 \sim 3\text{m}^2$	面积 $> 3\text{m}^2$

9.3 缺陷的综合评定

9.3.1 同一检测对象存在多项缺陷时，应综合评定其整体质量等级。综合等级应以最严重的单项缺陷等级为准。

9.3.2 当同一检测对象存在三项及以上II级缺陷时，应考虑缺陷的累积效应，可将综合评定等级上调一级。

9.3.3 缺陷的累积效应判定应由具有中级及以上技术职称的人员组织会商确定。会商应形成会议纪要，与会人员应签字确认。

9.3.4 对判定为II级（一般缺陷）的缺陷，应建立缺陷跟踪档案，记录每次检测的缺陷发展情况。跟踪观察周期应不超过12个月。

9.4 检测报告编制

9.4.1 检测报告应真实、准确、完整地反映检测过程和检测结果。检测报告应由检测单位盖章、技术负责人签字后生效。

9.4.2 检测报告应包含下列内容：

- 工程概况：工程名称、地点、建设单位、设计单位、施工单位、监理单位等基本信息；
- 检测依据：检测方案编号、相关标准和规范名称及编号；
- 检测项目及方法：检测项目清单、检测方法、仪器设备名称型号及标定情况；
- 检测结果：各检测项目的实测数据、图谱和分析结论；
- 缺陷判定：缺陷类型、等级、位置、尺寸及对结构安全的影响评价；
- 处理建议：针对不同等级缺陷的处置建议和后续检测计划；
- 附件：检测方案、原始记录、图谱、影像资料、校准证书等。

9.4.3 检测报告中应明确标注检测结论的有效范围和使用限制条件。检测报告仅对检测样本和检测时结构的状态负责。

9.4.4 检测报告应采用统一的格式和编号系统。报告编号应包含检测单位代码、年度、月份和流水号。

9.4.5 检测报告中的图表应清晰规范，图名、表名、图号、表号应完整。缺陷照片应标注缺陷位置标尺。

9.4.6 检测报告应装订成册，电子版应与纸质版内容一致。电子版报告应采用PDF格式，应包含数字签名或电子签章。

9.4.7 检测报告应经审核人员审核、签发人员签发后方可生效。审核人员应对报告内容的完整性和准确性进行核查，签发人员应对报告结论的合理性和有效性负责。
