

TJG

天津市公路工程建设标准

TJG/T E1003-2025

路基路面病害检测规程（三维探地雷达法）

Detection Specification of Roadbed and Pavement Disease
(3D Ground Penetrating Radar Method)

2025-09-01 发布

2025-10-01 实施

天津市交通运输委员会发布

天津市公路工程建设标准

路基路面病害检测规程（三维探地雷达法）

Detection Specification of Roadbed and Pavement Disease
(3D Ground Penetrating Radar Method)

TJG/T E1003-2025

主编单位：天津市交通科学研究院

参编单位：天津市公路事业发展服务中心

天津高速公路集团有限公司

雄安新区建设工程质量安全检测服务中心

天津天昂高速公路有限公司

批准部门：天津市交通运输委员会

实施日期：2025 年 10 月 01 日

前 言

根据天津市交通运输委员会《关于下达 2023 年天津市公路工程建设标准制修订计划的通知》（津交发〔2023〕163 号）的要求，由天津市交通科学研究院承担《路基路面病害检测规程（三维探地雷达法）》（2023-G13）的编制工作。

本规程经广泛调研、开展专题研究，借鉴国内外先进科研成果，参考国内现行标准，按照“全面、实用”的原则，针对三维探地雷达法路基路面病害检测，从三维探地雷达系统、检测方法和流程、成果编制和提交、信息化管理等方面进行了规定和说明，进一步规范路基路面三维探地雷达检测技术，提高病害体检测成效。

本规程包含 8 章和 4 个附录，分别是总则、术语、基本规定、设备技术要求、准备工作、现场检测、数据处理与解释、报告编制、附录 A 电磁波在地下介质中传播速度的计算方法、附录 B 三维探地雷达现场检测记录表、附录 C 路基路面病害记录表、附录 D 路基路面病害明细表。

本规程由商耀祥、张红兵、王文超、周海成、曹立军、申印璋、郝中华负责起草第 1、2、3、4 章，于洪兴、满伟、闫少敏、席慧彩、张璐、刘路、武岩峰、于彬负责起草第 5 章，黄桂东、裴旺、闫燕红、李永强、吕晓明、刘永江负责起草第 6 章，王德群、张旭良、赵泽平、任丽婷、牛皖豫、兰云松、刘坤嵩负责起草第 7、8 章。

本规程由天津市交通运输委员会负责管理，天津市交通科学研究院负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送天津市交通科学研究院（联系人：黄桂东，地址：天津市东丽开发区一经路 25 号，邮编：300300，E-mail: 3869902386@qq.com），以便修订时参考。

主 编 单 位：天津市交通科学研究院

参 编 单 位：天津市公路事业发展服务中心

天津高速公路集团有限公司

雄安新区建设工程质量安全检测服务中心

天津天昂高速公路有限公司

主 编：黄桂东

主要参编人员：于洪兴 周海成 满 伟 曹立军 商耀祥 王德群
李永强 裴 旺 张旭良 席慧彩 张 璐 闫少敏
任丽婷 王文超 郝中华 张红兵 武岩峰 牛皖豫
申印璋 刘永江 吕晓明 赵泽平 闫燕红 刘 路
兰云松 于 彬 刘珅嵩

主 审：李 仙

参加审查人员：邹宝刚 孙吉书 曾 伟 栗宝鹃

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	3
4 设备技术要求	4
4.1 设备组成	4
4.2 设备技术要求	4
5 准备工作	6
5.1 前期准备工作	6
5.2 现场准备工作	7
6 现场检测	9
6.1 采集参数选择	9
6.2 现场检测步骤	10
7 数据处理与解释	12
7.1 数据处理	12
7.2 病害解释	12
7.3 病害验证	14
8 报告编制	15
附录 A 电磁波在地下介质中传播速度的计算方法	16
附录 B 三维探地雷达现场检测记录表	17
附录 C 路基路面病害记录表	18
附录 D 路基路面病害明细表	19
本规程用词说明	20

1 总则

1.0.1 为规范三维探地雷达检测路基路面病害工作，明确检测方法和技术要求，保证检测质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于三维探地雷达检测各等级公路的路基路面隐蔽病害。

1.0.3 宜采用先进的三维探地雷达数据处理与解释技术，提高检测数据处理效率和质量。

1.0.4 三维探地雷达检测路基路面病害除应符合本规程的规定外，尚应符合国家及行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 三维探地雷达 3d ground penetrating radar

一种采用阵列天线发射、接收技术，通过面状扫描，形成测区高密度三维电磁波探测数据的探地雷达。

2.0.2 阵列天线 array antenna

由多个相同的发射天线和接收天线按一定规律排列组成的三维探地雷达天线系统。

2.0.3 天线通道 antenna channel

阵列天线中由每一对发射天线和接收天线组成的单个数据采集通道。

2.0.4 单通道测线 single channel survey line

由单个天线通道测点组成的线状轨迹。

2.0.5 雷达测线 radar survey line

由全部单天线测线组成的束状轨迹。

2.0.6 测线宽度 single detection width

雷达测线所覆盖的探测宽度。

2.0.7 纵剖面 longitudinal section

沿三维探地雷达检测前进方向且垂直地面的剖面。

2.0.8 横剖面 cross section

垂直于三维探地雷达检测前进方向且垂直于地面的剖面。

2.0.9 水平切片 horizontal slice

垂直于雷达波传播方向的不同信号接收时刻或深度的切片。

2.0.10 干扰源 interference source

在地下病害体检测中，影响检测信号质量、数据信噪比和检测深度的各种干扰因素。

3 基本规定

3.0.1 三维探地雷达检测路基路面病害内容包括路基的空洞、脱空、疏松、富水和路面的裂缝、基层松散、层间结合不足等。

3.0.2 三维探地雷达检测路基路面病害的工作流程应包括准备工作、现场检测、数据处理与解释、成果编制。

3.0.3 三维探地雷达应由具备相应专业能力的人员负责保管、使用和维护，并应采取有效的防护与管理措施，以确保设备及电子器件的安全与稳定。

3.0.4 三维探地雷达使用前应检查调试正常，并在有效检校周期内，保证准确可靠，仪器设备的操作尚应遵从其产品使用要求。

3.0.5 三维探地雷达检测路基路面病害，应从工程实际出发，根据检测目的和现场测试条件，按本规程规定合理选择设备参数和布置检测方案。

3.0.6 路面过度潮湿或用富金属等电导率较高材料铺筑的道路，不宜开展三维探地雷达检测作业。

3.0.7 检测数据及资料应完整保存，宜采用信息化管理。

4 设备技术要求

4.1 设备组成

三维探地雷达由承载车、主机控制系统、阵列天线、距离传感器、空间定位系统、供电系统、数据采集软件和数据解释软件等组成。

4.2 设备技术要求

4.2.1 主机控制系统和阵列天线的性能应符合下列规定：

- 1 A/D 转换的位数应不小于 16 位；
- 2 信噪比应不小于 90dB；
- 3 天线阵列应为屏蔽型天线，各通道应保持良好的一致性；
- 4 测定路面病害时，天线阵列的中心频率宜不小于 600MHz，通道间距应不大于 10cm；测定路基病害时，天线阵列的中心频率宜为 100MHz~600MHz，通道间距应不大于 30cm。

4.2.2 距离传感器分辨率应不大于 10mm。

4.2.3 空间定位系统宜采用卫星定位装置，也可采用连续运行基准站系统或其他定位系统，卫星定位装置宜通过差分校正等方法提高定位精度。空间定位系统应满足下列规定：

- 1 测点水平定位误差应不大于 100mm；
- 2 定位数据采集频率应不小于 5Hz。

4.2.4 供电系统续航能力应在 4h 以上。

4.2.5 数据采集软件应具备下列功能：

- 1 控制设备启停，监测设备运行状态；
- 2 设备采集参数设定，数据的创建、采集、存储和显示；
- 3 基于地理信息系统的实时检测轨迹显示；

- 4 雷达数据与定位数据的同步回放和关联定位；
- 5 作业过程中的点位标记；
- 6 对采集的数据进行导出。

4.2.6 数据处理与解释软件应具备下列功能：

- 1 文件管理，包括数据打开、数据存储、项目管理、位图输出等；
- 2 数据预处理，包括数据的自检、合并、切割、转换和整理等；
- 3 信号处理，包括数据信号的零点校正、去噪、滤波、偏移、反褶积、增益等；。
- 4 信息关联，包括检测图像、检测轨迹、里程桩、地图、现场视频等；
- 5 解释与标记，包括病害定位、切片分析、标记、信息提取和输出等。

5 准备工作

5.1 前期准备工作

5.1.1 前期准备工作应包括资料收集、现场踏勘、检测方案编制等内容。

5.1.2 资料收集宜包括下列内容：

- 1 测区内的道路工程、地下工程等设计和施工资料；
- 2 测区内既有的道路工程检测资料、养护维修等资料；
- 3 测区内地下管线资料；
- 4 测区内岩土工程、工程地质和水文地质勘察资料；
- 5 其他与检测工作相关资料。

5.1.3 现场踏勘应包括下列内容：

- 1 核实已收集资料的完备性及可利用程度；
- 2 了解工作环境条件，包括测区的里程桩、车道分布、通行状况、交通状况、卫星定位系统通信状况、坐标控制点等；
- 3 了解典型干扰源的分布；
- 4 现场调查补充缺失资料；
- 5 核实现场布设测线的可行性，承载车无法到达的测试区域可采用手推车方式进行检测；
- 6 评估现场检测作业风险。

5.1.4 检测方案应根据工作目的、工作要求、现场病害情况、场地干扰因素和作业条件等编制，宜包括下列内容：

- 1 项目概况；
- 2 检测工作条件分析；
- 3 检测依据；
- 4 检测工作重难点分析及应对措施；
- 5 检测内容和检测方法；

6 检测计划和保障措施;

7 拟提交的成果资料。

5.1.5 检测工作开始前, 应进行检测方案技术交底及相关安全培训。

5.2 现场准备工作

5.2.1 现场准备工作应包括检测环境、设备安装、距离标定、测线布置。

5.2.2 现场作业前应检查测区检测环境。检测环境应符合下列要求:

- 1 路面应无明显积水、积雪;
- 2 路面宜清洁、平整, 无大块凸起物;
- 3 周围应无强电磁干扰信号。

5.2.3 设备安装应符合下列要求:

- 1 检查承载车的轮胎气压应正常, 车胎应清洁, 不得黏附杂物;
- 2 应按照设备厂商提供的安装方法将雷达主机、阵列天线、采集触发设备、定位设备等安装牢固;
- 3 检查设备各连接线安装无误后开机预热, 预热时间不得少于厂商规定的时间;
- 4 启动设备采集软件, 检查各部分工作状态。

5.2.4 现场作业前应进行距离标定, 距离标定误差应不大于 0.1%。距离标定应按下列步骤进行:

- 1 选取平整直线无坡度路段, 用全站仪或钢卷尺量取不小于 100m 的测试路段, 其长度作为距离标准值 L_s , 分别在起始、终止点做标记;
- 2 将承载车所有轮胎的胎压调整为正常状态;
- 3 将测距轮中心线对准起始点标记, 启动三维探地雷达开始检测, 承载车出发沿车道线平行方向驶向终点, 当测距轮中心线与终点标记对准时停止, 记录探地雷达输出的距离测试值, 精确至 0.01m。重复测试 3 次, 取测试结果的平均值作为距离测试结果 L_a ;
- 4 距离传感器的距离标定误差 δ 按式(5-2-4)计算:

$$\delta = \frac{|L_a - L_s|}{L_s} \times 100 \quad \text{式(5-2-4)}$$

式中: δ ——测距传感器距离标定误差 (%) ;

L_a ——距离测试结果（m）；

L_s ——距离标准值（m）。

5 当距离标定误差不满足要求时，应按照设备厂商提供的方法更新距离传感器参数，并重新标定；

6 检测时承载车胎压变化明显或气温变化超过 15℃，应重新标定。

5.2.5 测线应提前布设，测线布设应符合以下要求：

1 测线的数量应根据测线宽度和测区断面宽度确定；

2 相邻测线的边缘间距宜不大于 0.3m。

6 现场检测

6.1 采集参数选择

6.1.1 采集参数选择应在测区实地或与其相近的条件下进行，且应避开干扰源。

6.1.2 采集参数应根据检测设备、检测深度等因素综合分析确定。

6.1.3 天线频率的选取：

- 1 应根据所探测目标的深度和规模，选取适当中心频率的天线；
- 2 在满足探测深度前提下，应选择频率较高的天线；
- 3 单一天线不能完全达到探测目的时，应采用两个或两个以上频率的天线检测。

6.1.4 记录时窗长度按式(6-1-4)计算：

$$T = K \frac{2H_{max}}{v} \quad \text{式 (6-1-4)}$$

式中：T——记录时窗（ns）；

K——时窗加权系数，取 1.3~1.5；

H_{max} ——最大探测目标深度（m）；

v ——电磁波在地下介质中的传播速度（m/ns）。

常用计算方法见附录 A，宜通过已知目标体的埋深标定测区地层平均电磁波传播速度，不具备条件时可结合工程经验取值。

6.1.5 测线的道间距应不大于 5cm。

6.1.6 雷达设置采样频率宜不低于所采用天线主频的 20 倍。

6.1.7 信号的增益宜使信号幅值不超出信号监视窗口的 3/4。

6.1.8 宜采用叠加采集的方式提高信号的信噪比。

6.2 现场检测步骤

6.2.1 启动测试系统，按测试要求设置完毕所需的测试状态。

6.2.2 开启安全警示灯，将测试车辆就位于测试区间起点前一定距离，以保证到达测试区域时能够达到测试要求的稳定车速。

6.2.3 按要求进行数据文件命名和数据存储设置，并及时记录测试文件相关工程信息，填写附录 B《三维探地雷达现场检测记录表》记录内容应清晰、准确、完整。

6.2.4 测试车辆驶入测试区域时，测试人员启动系统的采集程序，开始数据采集。

6.2.5 测试过程中应符合下列规定：

- 1 测试速度应保持均匀且与仪器扫描速率相匹配；
- 2 测试过程中，随时观察测量设备工作状态和各通道数据状态，发现异常应及时记录，并分析异常原因，必要时复测；
- 3 在测区起点、测区终点、途经里程桩等位置打标记；
- 4 及时记录各类干扰源、地面积水、变形等环境情况；
- 5 密切注意雷达图像变化，对图像异常段做好记录，必要时进行复核；
- 6 当测试区域不满足测试条件时，应记录其位置和范围，待具备测试条件后补充检测。

6.2.6 当测试车辆驶出测试区域时，测试人员停止数据采集和记录，并恢复仪器各部分至初始状态。

6.2.7 数据采集完毕后应及时检查原始数据质量，原始数据质量不符合要求时，应及时进行重测或补测。原始数据质量应符合下列规定：

- 1 原始数据文件应完整，无数据缺失等情况；
- 2 原始数据的信噪比应满足数据处理、解释的需要；
- 3 原始数据有效信号深度应满足探测工作要求；
- 4 原始数据信号削波部分不宜超过全剖面的 5%；
- 5 原始数据剖面上不应出现连续的坏道，且坏道比例不宜超过全剖面的 5%；
- 6 原始数据不应有遗漏路段。

6.2.8 所有数据采集完毕后，关闭测试系统电源，结束采集工作。

6.2.9 测试车驶至安全区域后，拆卸设备并逐件清点存放，应确保无遗漏。

7 数据处理与解释

7.1 数据处理

7.1.1 三维探地雷达的数据处理包含数据预编辑、数据预处理、常规处理、高级处理、解释处理，数据处理方法和步骤应符合现行《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》（JGJ/T 437）中的相关规定。

7.1.2 影响三维探地雷达探测的典型干扰源类型可按表 7.1.2 划分。

表 7.1.2 典型干扰源分类

干扰源类型	典型干扰源
地上干扰	邻近的建筑物、桥梁、标志牌、立柱、护栏、车辆等，地面井盖及钢板等
地下干扰	地下管线、管沟及井室，降水井，地下通道，地下构筑物，树根等
电磁干扰	架空电线、路灯、手机、信号基站等

7.2 病害解释

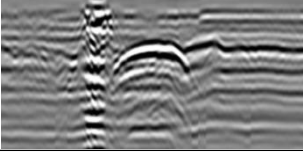
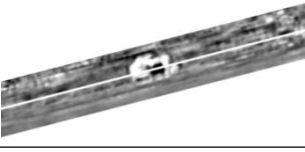
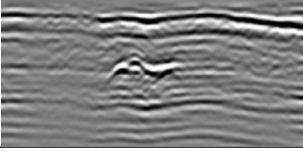
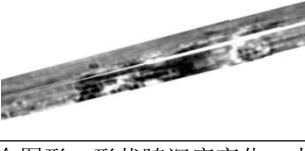
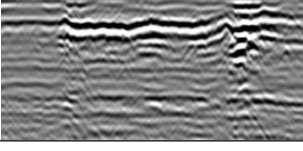
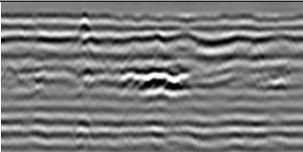
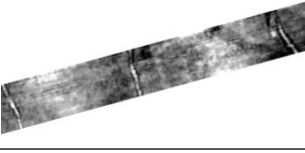
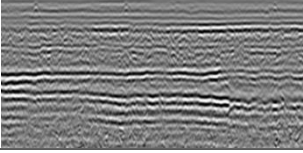
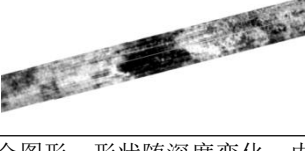
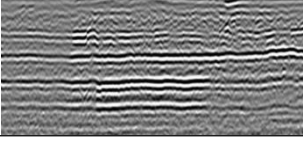
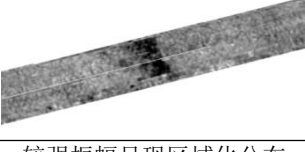
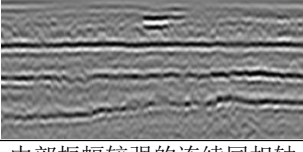
7.2.1 三维探地雷达资料解释流程包括异常目标的提取、干扰异常的识别、病害的确定、病害解释、解释结果。

7.2.2 三维探地雷达资料解释应符合下列规定：

- 1 解释成果应采用专业语言描述，用于成果解释的雷达图像应清晰、信噪比高；
- 2 宜根据信号的同相轴及振幅、相位和频率等属性特征提取异常目标；
- 3 应结合现场记录和调查资料，排除异常干扰；
- 4 宜结合工作目的以及路基路面的表观病害、历史病害及处治、地下管线破损、工程地质等调查资料，根据雷达图像特征确定路基路面病害；
- 5 应确定路基路面病害的位置和范围，并在雷达图像上标注；
- 6 病害位置应采用空间定位坐标和公路里程位置综合表示。未设里程桩的公路，病害里程位置宜采用检测点到永久参照标志的距离表示。

7.2.3 路基路面病害宜按表 7.2.3 进行分类和识别。

表 7.2.3 路基路面病害的三维探地雷达图像特征

病害类型	水平切片图像及特征	垂直剖面		
		纵剖面图像及特征	振幅	相位与频谱
空洞			整体振幅强	顶部反射波相位与入射波相反，频率高于背景场
	病害区域边界明显，顶部呈强振幅闭合图形，内部色彩单一，下部形状随深度变化，内部颜色逐渐杂乱	顶部为倒悬双曲线形态或平板状形态，两端绕射波明显，下方多次波明显		
脱空			整体振幅强	顶部反射波相位与入射波相反，频率高于背景场
	不规则闭合图形，内部色彩单一	顶部反射波组表现为平板状形态，多次波明显		
疏松			整体振幅强	顶部反射波相位与入射波一致，频率一般低于背景场
	闭合图形，形状随深度变化，内部颜色逐渐杂乱，类似于“雪花”或“针尖”状	反射波同相轴断续、较为杂乱，绕射波的程度与疏松的程度正相关		
富水			顶部反射波振幅强；富水体埋深较浅时，多伴随强振幅多次波；埋深较深时，振幅强度衰减较快	顶部反射波相位与入射波一致，频率一般低于背景场
	呈强振幅闭合图形，图形内部颜色单一，形状随深度变化	顶部反射波连续，绕射波不明显，底部反射波不明显，多次波或者吸收现象明显		
裂缝			振幅较强	——
	连续窄带状图形，走向不规则，沿深度分布	沿深度方向陆续分布的较小“双曲线”，顶端振幅强，有间断，衰减慢		
基层松散			整体振幅强	顶部反射波相位与入射波一致，频率一般低于背景场
	闭合图形，形状随深度变化，内部颜色杂乱，类似于“雪花”或“针尖”状	反射波同相轴断续、较为杂乱		
层间结合不足			振幅较强	——
	较强振幅呈现区域化分布	中部振幅较强的连续同相轴		

7.3 病害验证

7.3.1 对于路基空洞、脱空及其他严重缺陷应全部进行验证，对其他病害应选取代表性位置进行验证，进一步了解和确定病害情况。

7.3.2 通过三维探地雷达记录的空间坐标，提取病害的位置范围及埋深，宜在实地做标记。

7.3.3 病害验证应确定其类型、埋深范围等属性。

7.3.4 验证点应布设在病害雷达图像反映最强部位或中心部位，并应避开既有地下管线及构造物。

7.3.5 钻孔验证时，应采用视频、影像、文字等进行记录。具备探孔时，宜采用内窥法记录探孔内病害情况。

7.3.6 路基路面病害验证宜符合下列规定：

1 宜根据所取出路面结构芯样的材料类型、分层厚度、损坏状态以及钻孔内部情况等判断路面病害类型；

2 宜根据钻孔及钻探的钻进速率、触探贯入速率以及取出土样的类型、密实度、含水率等的异常情况，判定路基病害的埋深及性质。

7.3.7 根据验证方式和现场情况应填写附录 C《路基路面病害记录表》。

7.3.8 验证完成后遗留的孔洞，应根据工程要求选用适宜的材料分层回填，回填材料的强度不宜小于原状材料。

8 报告编制

8.0.1 报告宜包括下列内容：

- 1 项目概况；
- 2 检测依据；
- 3 检测内容与方法；
- 4 检测结果；
- 5 结论及病害处治建议；
- 6 附图及附表。

8.0.2 病害处治建议应根据路基路面病害的类型、规模，结合相关工程资料及工作目的，初步判断病害成因，并提出相应建议。

8.0.3 附图应符合下列规定：

- 1 图幅范围应完整覆盖测试区域，比例尺宜为 1:100~1:300，典型剖面图应与病害平面分布图位置对齐、比例一致；
- 2 附图应标注坐标系、比例尺、指北针、路线及车道位置、里程桩号、水平切片深度、典型剖面位置、病害图例、病害位置等内容；
- 3 雷达图像应经过去噪、增益等处理，确保病害图像特征清晰。

8.0.4 附表应按附录 D《路基路面病害明细表》编制。

附录 A 电磁波在地下介质中传播速度的计算方法

A.0.1 已知介质的介电常数，计算电磁波波速：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{式 (A.0.1)}$$

式中： v ——电磁波在地下介质中的传播速度（m/ns）；

c ——真空中的电磁波传播速度，取 0.3 m/ns；

ϵ_r ——介质的相对介电常数。

A.0.2 已知目标体的埋深，计算电磁波波速：

$$v = \frac{2h}{t} \quad \text{式 (A.0.2)}$$

式中： v ——电磁波在地下介质中的传播速度（m/ns）；

h ——已知目标体埋深（m）；

t ——接收到已知目标体所反射的电磁波时间（ns）。

A.0.3 共中心点法，计算电磁波波速：

$$v = \frac{X}{\sqrt{t_x^2 - x_d^2}} \quad \text{式 (A.0.3)}$$

式中： v ——电磁波在地下介质中的传播速度（m/ns）；

X ——雷达天线距中点距离（m）；

t_x ——不同 X 点上的雷达的反射时间（ns）；

x_d ——中点反射时间（ns）。

附录 B 三维探地雷达现场检测记录表

表 B 三维探地雷达现场检测记录表

检测编号		检测日期		天气	
工程名称					
设备名称及编号					
采集参数	天线频率(MHz): 时窗(ns): 道间距(cm):				
道路信息					
测线编号	文件名称		测线方向及位置		测线起终点
测线 布置图					
备注					
校核人		记录人		试验人	

附录 C 路基路面病害记录表

表 C 路基路面病害记录表

工程名称							
道路名称							
病害类型					病害位置		
病害尺寸 (m)	长度		宽度		中心	N	
	埋深		高度		坐标	E	
三维 剖面图	水平切片：				横剖面：		
	纵剖面：				地理位置图：		
周边环境 及验证资料	现场照片及描述：						
初步成因分析							
初步处理建议							
校核人		记录人			试验人		

附录 D 路基路面病害明细表

表 D 路基路面病害明细表

序号	方向	车道	起点 桩号	止点 桩号	病害 类型	埋深 (m)	病害尺寸 (m)			中心坐标		备注
							长度	宽度	高度	N	E	

本规程用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的；正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：正面词采用“应”，反面词采用“不应”。
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 5 规程中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。