

T/CECS G XXXX: 2026

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction

Standardization

弹性波动法道路病害检测规程

Code for Elastic Wave Method of Defects Test in Roads

(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

弹性波动法道路病害检测规程

Code for Elastic Wave Method of Defects Test in Roads

T/CSCS G: XXXXXX

主编单位：江苏筑升土木工程科技有限公司

佛山市盛方达建设工程检测有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：

×××出版社有限公司

北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2019 年第一批中国工程建设标准化协会（CECS G）修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2019]84 号），由江苏筑升土木工程科技有限公司、佛山市盛方达建设工程检测有限公司承担《弹性波动法道路病害检测规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

规程编制组经调查研究、现场实验等方式，充分吸收近年来国内外在道路地下隐性病害研究的最新成果，并在广泛征求意见的基础上，完成本规程的编写工作。

本规程共分 8 章，主要内容包括：1 总则；2 术语和符号；3 仪器设备；4 检测准备；5 检测作业；6 数据处理与分析；7 病害验证；8 成果与报告。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归管理，由江苏筑升土木工程科技有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告标准日常管理组：中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn）。

主 编 单 位：江苏筑升土木工程科技有限公司

佛山市盛方达建设工程检测有限公司

参 编 单 位：上海交通大学

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

参 加 人 员：

目 次

前 言	I
1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 仪器设备	5
3.1 一般规定	5
3.2 震源	5
3.3 检波器	6
3.4 数据采集模块	6
3.5 辅助设备	7
4 检测准备	8
4.1 一般规定	8
4.2 系统检查	9
4.3 现场试验	9
4.4 标定试验	10
5 检测作业	11
5.1 一般规定	11
5.2 冲击映像法	13
5.3 高密度面波法	15
6 数据处理与分析	18
6.1 一般规定	18
6.2 冲击映像法	18
6.3 高密度面波法	20
7 病害验证	24
8 成果与报告	26
8.1 一般规定	26
8.2 成果图件	26

8.3 文字报告	29
附录 A 现场记录表	31
附录 B 地下隐性病害成果统计表	33
附录 C 地下隐性病害检测成果代号和图例	34

1 总则

1.0.1 为规范和指导弹性波动法在道路地下隐患病害检测中的应用,提高路面结构和路基的病害识别的水平,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各等级公路、城市道路的地下疏松、脱空和空洞等病害的检测,机场跑道可参照使用。

1.0.3 进行道路地下隐性病害检测时,应根据实际用途和相关标准的要求,选择本规程规定的检测方法。

1.0.4 弹性波动法道路地下隐性病害检测应积极稳妥地采用新技术、新设备。

1.0.5 采用弹性波动法检测道路地下隐患病害除应符合本规程的规定外,尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行有关标准的规定。

条文说明

本规程的适用范围主要是应用于公路和城市道路,旨在对路面结构层、地基的疏松、脱空和空洞病害进行检测,以及病害处置完成后的效果评价,可供质量监督部门、检测机构、工程监理及施工企业等使用。

在对道路地下隐性病害进行检测时,应根据实际用途和适用范围选择适合的技术方法,除按本规程规定的仪器设备、检测作业、数据处理及报告等要求开展检测工作外,尚应遵从养护、物探、测量等技术规范的相应规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 弹性波动法 elastic wave method

基于弹性波动理论，通过击打被检测物表面，在其内部激发弹性波，通过分析弹性波在介质中的传播和响应特性，判断内部病害的无损检测方法。

2.1.2 冲击映像法 impact imaging method

通过分析近源波动场的响应特性，判断道路结构隐性病害的检测方法。

条文说明

冲击映像法分析的是近源波场，有效测试深度为 1.2m~2.0m。响应波形是道路隐性病害在表面的映像，其波场特征是隐性病害的综合反应。通过分析响应波形特征随检测点的变化，形成以冲击响应强度为评价指标的病害平面分布图，判定路面结构的疏松、脱空病害。

2.1.3 高密度面波法 high density surface wave method

通过加密排列，获得高密度面波数据，分析其频散特性，反演判断范围内隐性病害的检测方法。

条文说明

高密度面波法的有效测试深度为 2~10m，形成以剪切波速度为评价指标的病害深度剖面图，用于判定路基的疏松、空洞病害。

2.1.4 检测点 detecting point

激发点与仪器第一通道所连接的检波器的中点。

2.1.5 偏移距 offset

激发点与仪器第一通道所连接的检波器之间的距离。

2.1.6 点测式 point type

使用单个检波器，对检测点进行逐点检测的方法。

2.1.7 扫描式 scanning type

由多个检波器组成阵列，沿测线对检测点进行同步检测的方法。

2.1.8 排列 array

为完成一个面波采集记录，布置在一条测线上接收震动信号的检波器组合。

2.1.9 排列长度 spread length

为完成一个面波采集记录，布置在一条测线上的接收检波器组合的长度。

2.1.10 道间距 channel distance

排列中相邻检波器之间的距离。

2.1.11 源检距 source offset

震源位置到检波器的距离，最大源检距指震源位置到最远检波器的距离。

2.1.12 冲击响应强度 impact response intensity

表征被检测物面对冲击作用时响应程度的指标，为响应波形振幅绝对值之和。

2.1.13 面波频散 frequency dispersion of surface wave

面波各频率组分具有不同的传播速度的现象。

2.1.14 基阶面波 first-mode surface wave

多个传播模态中以第一阶振型传播，在各阶振型中速度最低的面波。

2.1.15 高阶面波 higher-mode surface wave

多个传播模态中以高阶振型传播的面波。

2.1.16 频散曲线 dispersion curve

面波相速度与频率间的关系曲线。

2.2 符号

a, b ——测区纵向、横向的测点数量；

A ——检测点的冲击响应强度；

A_0 ——冲击响应强度基准值；

D ——最大检测深度；

f_0 ——检波器的自然频率；

E_d ——动弹性模量；

F_s ——某一采样点的数值大小，即响应波形的振幅；

G_d ——动剪切模量；

I ——检测点的归一化冲击响应强度；

k ——检测点的冲击力修正系数；

K ——检测点的冲击力；

K_0 ——冲击力基准值；

v_p ——纵波波速；

v_R ——面波波速；

v_s ——剪切波波速；

V_{Rmin} ——面波相速度最小值；

β ——波长深度转换系数；

η_s ——面波与剪切波波速换算系数；

μ_d ——泊松比。

3 仪器设备

3.1 一般规定

3.1.1 仪器设备由激发装置、检波器、数据采集模块和辅助设备等组成。

3.1.2 仪器设备应定期校准和保养。

3.1.3 仪器设备在使用、运输和储存过程中，应采取防水、防暴晒和防震等保护措施。

条文说明

使用合格的仪器设备是取得可靠检测结果的前提条件。当前,由于生产厂家、工作原理、测试方式及精度控制标准等的不同,导致同类设备的测试结果存在较大差别,缺乏一个能够共同遵循的技术标准来保证测试质量。同时,随着仪器设备自动化、智能化程度的提高,“黑箱”效应逐渐显现,仪器设备的质量合格与否、技术状态是否正常等,仅凭眼观、目测已不能判断,而是需要专门的技术措施来检验。

因此,在开展现场检测工作之前,应针对所检测技术指标,选择精度合适、质量合格、状态正常的仪器设备。具备条件的,应将仪器设备送专业计量技术机构,经检验合格后使用。

3.2 震源

3.2.1 冲击映像法的激发装置应由震源、触发器和力传感器组成,并应符合下列规定:

- 1 人工锤击震源宜采用高碳钢圆头锤,质量为 (1.5 ± 0.1) kg,锤头直径为 (10 ± 1) mm;
- 2 机械冲击震源宜采用直流推杆式电磁铁,其行程为0mm~40mm,球形锤头直径为 (10 ± 1) mm,可产生 (600 ± 5) N的冲击荷载,并具有调节行程和偏移距的功能;
- 3 触发器应具有良好的灵敏度、稳定性和抗干扰能力;
- 4 力传感器量程宜为1kN,误差不大于 $\pm 0.1\%$,灵敏度为 (2.0 ± 0.2) mV/V。

条文说明

冲击映像法测试时,震源力度有一定影响,锤击过程中应尽量保持力度一致。机械冲击震源具有较好的稳定性,宜优先采用。震源力度的影响还可以在数据分析过程中进一步消除。

3.2.2 高密度面波法的震源应由震源、触发器、垫板组成,并应符合下列规定:

- 1 应根据检测深度选择震源;
- 2 可采用人工锤击式、机械冲击式或者电磁式,宜采用人工锤击式;
- 3 人工锤击时,震源的质量为 (4.0 ± 0.1) kg,锤头直径为 (100 ± 1) mm。

3.3 检波器

3.3.1 应采用垂直向的速度型检波器。

3.3.2 冲击映像法的检波器应符合下列规定：

- 1 自然频率宜为 100Hz；
- 2 在 100Hz~5000Hz 范围内应具有平坦的频率响应曲线。

3.3.3 高密度面波法的检波器应符合下列规定：

- 1 自然频率宜为 4Hz~20Hz；
- 2 检波器的选用可按下式计算：

$$f_0 \leq \beta \frac{V_{Rmin}}{D} \quad (3.3-1)$$

式中： f_0 ——检波器的自然频率（Hz）；

D ——最大探测深度（m）；

V_{Rmin} ——面波相速度最小值（m/s）；

β ——波长深度转换系数，取 0.5。

3.4 数据采集模块

3.4.1 冲击映像法的数据采集模块应符合下列规定：

- 1 通道数应大于 2 通道，宜为 6~12 通道；
- 2 动态范围宜为 120dB，不应低于 90dB；
- 3 模数转换（A/D）的位数不宜低于 24 位；
- 4 在 5Hz~5000Hz 范围内应具有平坦的频率响应曲线；
- 5 采样频率不应低于 1kHz；
- 6 具有频率响应与幅度一致性的自检功能。

3.4.2 高密度面波法的数据采集模块应符合下列规定：

- 1 通道数不应少于 12 通道；
- 2 通频带宜为 0.5Hz~4000Hz；

- 3 动态范围不应低于 120dB;
- 4 模数转换 (A/D) 的位数不宜低于 20 位;

3.4.3 应配置数据采集软件, 并符合下列规定:

- 1 具有设置采样频率、采样时长、激发方式、超前记录、滞后记录、前置放大倍数等采集参数的功能;
- 2 具有背景噪音、响应波形、采集系统工作状态、记录文件号等界面实时显示、调节的功能;
- 3 具有显示所有通道的响应波形, 以及是否超过动态范围的功能;
- 4 具有实时显示环境噪音和响应波形, 可调节显示范围和比例尺的功能;
- 5 具备剖面滚动采集功能;
- 6 有频响与幅度一致性的自检功能。

3.5 辅助设备

3.5.1 辅助设备包括数据传输电缆、耦合器和垫板。

3.5.2 数据传输电缆应为屏蔽式线缆, 具备良好的绝缘、抗电磁干扰性能。

3.5.3 耦合器质量宜为 (1.5 ± 0.2) kg, 具有良好的滑动、耐磨性能。

3.5.4 垫板宜为硬橡胶材质, 质量宜为 1.5kg~3kg, 圆形直径或方形边长宜为 200mm~300mm, 厚度宜为 30mm~50mm。

条文说明

在道路场景使用时, 应在激发点布设垫板, 避免损坏既有路面。垫板的尺寸、厚度、材料和硬度, 对原始数据的质量有较大影响。一般来讲, 采用厚度较小、硬度较大的垫板, 激发高频信号; 采用厚度较大、硬度较小的垫板, 激发低频信号。

4 检测准备

4.1 一般规定

4.1.1 检测准备工作应包括现场踏勘与资料收集、方案制定、系统检查、现场试验和标定试验。

4.1.2 现场踏勘与资料收集宜包括下列内容：

- 1 收集待检测路段建设、改建和养护阶段与路面结构相关的资料；
- 2 调查待检测路段气候环境、交通量、干扰源、路面技术状况等；
- 3 调查待检测路段地下给排水等管线的分布、直径和运行情况等。

4.1.3 试验方案宜包括下列内容：

- 1 试验目的、内容、范围和依据等；
- 2 试验的技术路线与重点难点；
- 3 现场试验与标定试验；
- 4 测线（测点）布设、数据采集、处理分析方法；
- 5 仪器设备配置与人员安排；
- 6 工作量与进度计划；
- 7 安全、质量和进度等保障措施；
- 8 报告编制与提交。

4.1.4 现场检测前的准备应符合下列规定：

- 1 应进行技术交底及安全培训；
- 2 应将检测区域内的路面清扫干净；
- 3 应进行干扰波调查，宜将检波器布置在检测区域的代表性位置，观察采集软件的环境噪音监控窗口，识别记录干扰信号。

条文说明

当路面存在碎石等杂物时，垫板无法摆放平整，激发时会产生杂波，影响原始数据质量，且被击碎的碎石可能损坏仪器设备。路面清扫应以无积水、无块状杂物为宜。

4.2 系统检查

4.2.1 仪器设备系统检查，包括数据采集模块的一致性检查、检波器的一致性检查和仪器设备连接检查。

4.2.2 数据采集模块的一致性检查，各通道的幅度和相位应一致，幅值偏差不应大于5%，相位时差不应大于所用采样间隔的一半。

4.2.3 检波器的一致性检查，应符合下列规定：

1 多个检波器的固有频率差不应大于 0.1Hz，幅值、灵敏度和阻尼系数差不应大于5%，相位时差不应大于所用采样间隔的一半；

2 采用高密度面波法时，偏移距应大于 10m 的，进行检波器的一致性检查。

4.2.4 数据采集模块和检波器的频率响应与幅度特性，应满足本规程第 3 章的要求。

4.2.5 触发器、力传感器与震源的连接，耦合器与检波器的连接，以及震源、检波器、数据传输电缆和数据采集模块的连接，应牢固、稳定，防止漏电、短路和接触不良等故障。

4.2.6 耦合器应垂直于路面，并与路面紧密接触，处于正常工作状态。

4.2.7 检查震源锤头和耦合器，磨损严重时应及时更换。

条文说明

系统检查是高效顺利完成检测工作的前提，应通过一致性检查，选择性能一致的仪器设备，确保原始数据的质量。

4.3 现场试验

4.3.1 冲击映像法的现场试验，应符合下列规定：

1 选择有代表性的路段，确定冲击力、偏移距、道间距和移动步长等技术参数，并保持不变；

2 对不同冲击力的响应波形进行频谱分析，确定满足检测深度和分辨率所需的冲击力，具体方法如下：

1) 调整震源行程或冲击速度，获得合适的冲击力，满足检测深度要求，并防止出现削波或波形饱和；

2) 调整偏移距，保证响应波形具有足够的分辨率以及合理的衰减趋势，满足测试精度要求；

- 3) 对响应波形进行频谱分析, 确保震源的频带宽度达到检测深度和精度的要求;
 - 4) 激发时避开车辆震动、工程施工等外界干扰的时段, 保证响应波形具有足够的信噪比;
 - 5) 宜采用机械冲击震源, 获得可控、稳定的冲击力。
- 3 现场试验每块检测区域的检测点数不应小于 64 个。

4.3.2 高密度面波法的现场试验, 应符合下列规定:

- 1 选择有代表性的路段进行试验, 范围应覆盖不同的地形地质单元;
- 2 采用展开排列方式采集面波, 根据基阶面波发育的强势段, 确定偏移距、道间距、排列长度和记录长度, 排列长度应与检测深度相近;
- 3 应根据采集记录进行频谱分析, 确定满足检测深度和分辨薄层需要的最佳激震方式;
- 4 在具有钻孔资料的场地应在钻孔旁布置试验点, 进行资料对比。

4.4 标定试验

4.4.1 冲击映像法的标定试验, 应符合下列规定:

- 1 对不同路面结构、不同技术状况的路段, 分别选取无病害路段和典型病害路段进行试验, 确定冲击力和冲击响应强度的基准值;
- 2 每种典型病害的区域不宜少于 3 处, 且每处不宜少于 64 个检测点;
- 3 采用控制变量法, 测定每类典型病害的冲击响应强度;
- 4 对标定结果, 应进行钻孔验证。

4.4.2 高密度面波法的标定试验, 应符合下列规定:

- 1 有钻孔资料时, 应结合已知资料进行频散分析, 确定层厚和各层剪切波速度;
- 2 可选用探地雷达其他方法进行标定。

条文说明

通过现场试验, 确定合适的采集参数, 获得高质量的原始数据, 满足测试深度、精度的要求。通过现有检测、探测和勘察等技术资料, 对现场试验的结果进行标定, 调整优化处理参数和评价指标。

5 检测作业

5.1 一般规定

5.1.1 检测作业包括测区划分、测点（测线）布设、参数设定、激发和采集记录等，检测作业流程见图 5.1.1。

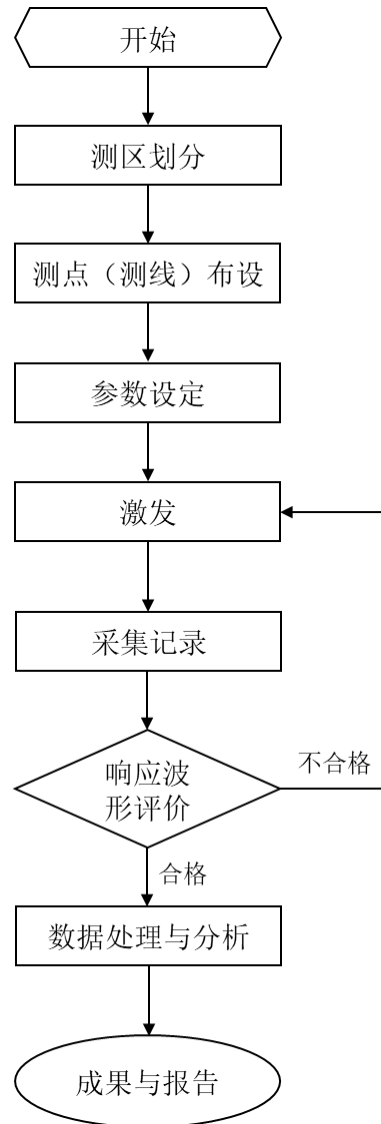


图 5.1.1 检测作业流程图

5.1.2 测点（测线）布设宜避开地形及其他干扰源，并应符合下列规定：

- 1 主测线应沿道路纵向或测区长度方向布设，辅助测线与之垂直；
- 2 测线宜通过已知点，长度、间距应满足异常检测成果联连续、完整，并于追踪；
- 3 重点区域或异常区域，测线应加密或网状布设；

4 病害处置完成后的效果检测，测线布设应穿越处置区域，且处置前、处置后的采集参数应一致。

条文说明

受到施工周期、工作面占用和成本投入，以及交通通行和社会环境等的影响，道路隐性病害的处置，常采用以注浆加固为主的非开挖处置方式，而处置效果评价是质量控制的重要手段。冲击映像法和高密度面波法能够以量化指标，形成病害平面分布图和深度剖面图，在工程实践中具有广泛的应用前景。

5.1.3 存在固定干扰源的路段，检波器、震源和干扰源应布设在一条直线上，且震源和干扰源应在检波器的同侧。

条文说明

冲击映像法检测时，应尽量避免存在车辆振动等干扰源的时段。高密度面波法检测时，应确保主要震源和干扰源在检波器的同侧。

5.1.4 采集参数应包括偏移距、移动步长、采样间隔、采样点数和记录时长等；

5.1.5 记录时长应能记录完整的响应波形，并满足精度和检测深度的要求。

5.1.6 波形采集应符合下列规定：

- 1 数据采集模块应设置在不滤波状态；
- 2 仪器设备系统应连接良好，各通道的增益一致，检波器安置状态良好；
- 3 波形振动时段宜占据显示界面的三分之二；
- 4 响应波形杂乱或不易收敛时，应调整激发位置，减小环境、人为等因素的影响。

5.1.7 数据文件应符合下列规定：

- 1 应包括项目名称、数据编号、检测点坐标、冲击力、采集参数等；
- 2 数据编号应与激发顺序一致，依次记录；
- 3 检测点坐标可采用测区相对坐标或里程桩号；
- 4 采集工作结束应及时下载数据并备份，按工程项目设置存储文件夹。

5.1.8 作业过程中应按本规程附录 A 填写现场记录表；并应符合下列规定：

- 1 应清晰、完整地记录路面结构、干扰源、采集参数等发生变化的位置；
- 2 应拍摄现场环境、仪器设备、检测过程、异常情况等的图片或视频；

3 采集工作结束后，应及时整理好现场记录表，并备份电子文件。

5.1.9 检测作业结束应及时进行数据存储与备份，并应符合下列规定：

- 1 按工程名称或工程代号设置存储文件夹；
- 2 对同一测点不同偏移距、不同激发方式或双端激发等，应有不同标识；

5.2 冲击映像法

5.2.1 测区划分应符合下列规定：

- 1 沥青混凝土路面按车道划分测区，长度宜为 100m，不足 100m 的按一个测区计；
- 2 水泥混凝土路面按单个板块划分测区；
- 3 同一测区内的路面结构应相同。

5.2.2 测点（测线）布设应根据病害分布情况确定，并应符合下列规定：

- 1 点测式宜按等间距布设检测点，扫描式宜按矩形阵列等间距布设检测点；
- 2 应按等间距布设测点，见图 5.2.1；

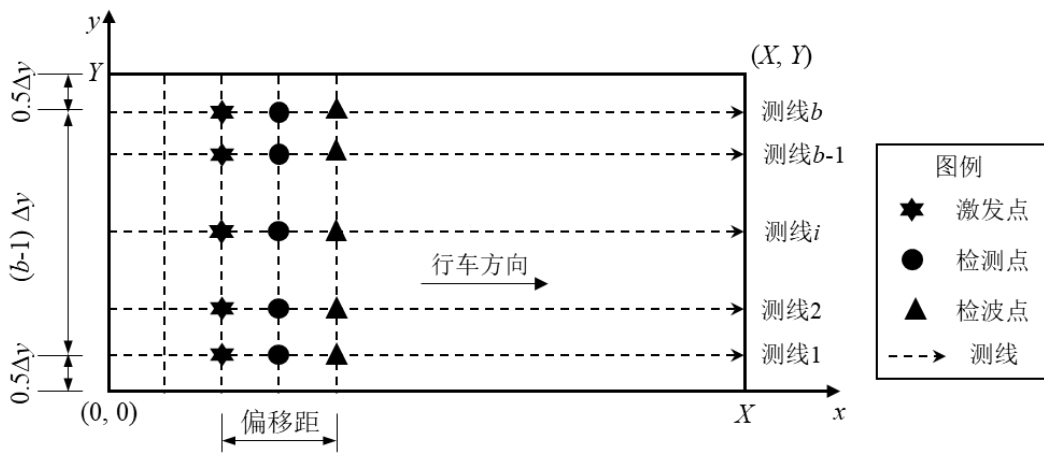


图 5.2.1 扫描式测线布设平面示意图

3 测点间距和测线间距应符合下列规定：

- 1) 检测点间距宜为 0.2m~0.5m，测线间距可稍大于检测点间距，宜保持一致；
- 2) 行车道轮迹带位置的测点和测线应加密，其距离应取本条第 1 款规定的小值；
- 3) 检测点与测区边界的距离应大于 0.5 倍偏移距，宜为 1 倍~2 倍偏移距。

5.2.3 参数设定应符合下列规定：

- 1 偏移距、移动步长宜为测点间距的 1 倍或 2 倍；
- 2 采样间隔由最高频率范围确定，不宜大于 0.1ms；
- 3 采样点数由最大测试深度、采样时长和采样频率综合确定，采样时长不宜小于 0.05s，采样点数不宜小于 400 点；

5.2.4 激发应符合下列规定：

- 1 应沿行车方向进行激发，激发点和检波点的位置偏差不应大于 40mm；
- 2 在测区边界或结构变化位置的测点，应在远离边界或变化位置的一侧进行激发；
- 3 人工震源激发时，下落高度应为 0.8m~1.1m，宜为 1.0m。应采用自由落体方式，垂直击打路面，手臂作用力不宜过大，震源接触路面后应立即提起，避免二次激发。

条文说明

二次激发产生的信号会同步记录在原始数据中，将严重影响数据质量和分析准确度。人工震源激发时，要注意手臂抬起的高度、作用力度和速度，应采用快速下落、迅速抬起的方式进行激发。

5.2.5 应实时进行响应波形质量评价，并应符合下列规定：

- 1 波形应连续完整，具有明显的波峰和波谷，收敛状态良好，见图 5.2.5；
- 2 因坏道未采集到响应波形，视为不合格；
- 3 响应波形不收敛，视为不合格；
- 4 响应波形出现削波，视为不合格；
- 5 出现不合格波形，应重测或补测。

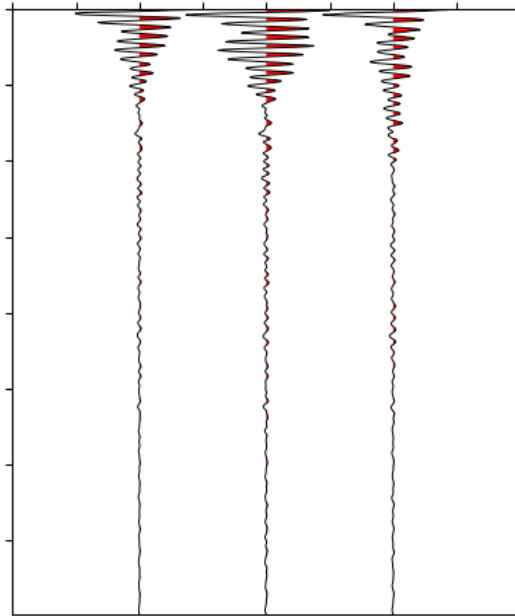


图 5.2.5 合格的响应波形示例

5.3. 高密度面波法

5.3.1 采用高密度面波法检测地下隐性病害应具备下列条件：

- 1 地下隐性病害应与其周边介质之间存在速度或波阻抗差异；
- 2 测区内无临空面、陡立面，相邻检波器之间的高差小于 1/2 道间距。

5.3.2 测线布设应符合下列规定：

- 1 应根据场地地形条件确定测线位置和检波器排列方式；
- 2 测线间距应小于最小目标病害地面投影等效直径的 1/3。

5.3.3 排列应沿测线布设，并符合下列规定：

- 1 应采用线性等道间距排列方式，震源在排列的延长线上；
- 2 道间距应小于最小检测深度所需波长的 1/2；
- 3 偏移距的大小应满足勘探深度的要求；
- 4 目标隐患宜位于排列中点，排列长度应大于预期面波最大波长的 1/2；
- 5 应采用滚动排列方式追踪地下隐性病害的分布。

5.3.4 参数设定应符合下列规定：

- 1 道间距应为 0.5m~2.0m，宜为 1.0m；

- 2 偏移距应为宜为道间距的 3 倍~6 倍;
- 3 移动步长宜为道间距的 3 倍~6 倍;
- 4 采样间隔应满足不同面波周期的时间分辨, 在最小周期内应采样 (4~8) 点, 不宜大于 0.5ms;
- 5 采样点数由最大测试深度、采样时长和采样频率综合确定, 并应符合下列规定:
 - 1) 最大测试深度小于 3m 时, 采样时长宜大于 0.05s, 采样点数宜大于 400 点;
 - 2) 最大测试深度为 3m~5m 时, 采样时长宜大于 0.1s, 采样点数宜大于 600 点;
 - 3) 最大测试深度为 5m~10m 时, 采样时长宜大于 0.15s, 采样点数宜大于 800 点。
- 6 采样时长应满足采集最大源检距基阶面波的采集需要。
- 7 如遇地层情况变化时, 应及时调整参数。

5.3.5 激发应符合下列规定:

- 1 应在来车方向进行激发, 激发点的位置偏差不应大于 0.2m;
- 2 人工锤击时, 震源下落高度应为 1.8m~2.2m, 宜为 2.0m。应采用自由落体方式, 垂直击打路面, 手臂作用力适中且保持不变, 防止近源道出现削波;
- 3 简单地质条件下可采用单端激震法, 复杂地质条件下宜采用双端激震法。

5.3.6 面波采集应符合下列规定:

- 1 宜采用半排列或部分道移动采集面波, 各段间有相互重叠;
- 2 记录的近震源道不应出现削波, 排列中不宜有坏道;
- 3 应清除易引起检波器震动的物品, 在风力较大条件下工作, 检波器应挖坑埋置。
- 4 重要异常及发现畸变曲线时应重复观测;
- 5 应布置复测检查工作, 复测检查的工作量不得少于总工作量的 5%。复测波形与原波形应相似, 频散曲线应一致。

条文说明

高密度面波法采集过程中, 通过叠加排列的方式, 获得不同源检距的原始数据。从而可以在数据处理与分析阶段, 合并各排列重复的地震道, 形成覆盖全测线的共激发点大排列, 有效提高数据密度和结果准确度。

5.3.7 应实时进行面波质量评价，并应符合下列规定：

1 排列中各道波形应连续完整，收敛状态良好，起跳点、波峰和波谷明显，且往远离震源一侧依次滞后出现，见图 5.3.7；

2 削波和常规地震勘探中的坏道，均应作为坏道处理；

3 近源道出现削波或坏道，视为不合格；

4 非边道的相邻两道坏道和大于 3 道的非相邻坏道，视为不合格；

5 排列中坏道大于使用道数的 10%，视为不合格；

6 记录长度不满足采集最大源检距基阶面波的，视为不合格；

7 基阶面波应为强势波，否则视为不合格；

8 频散曲线拐点和曲率变化的位置出现明显位移，视为不合格；

9 出现不合格波形，应重测或补测。

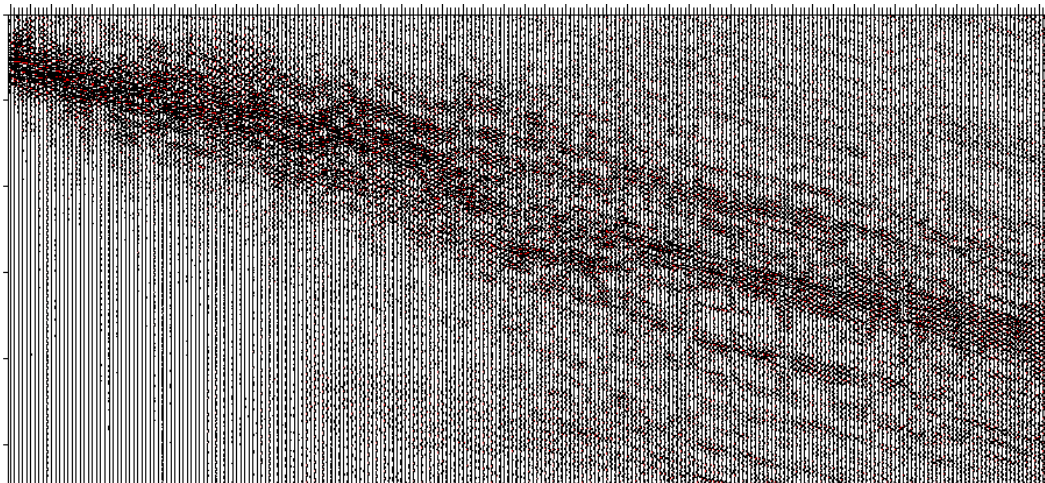


图 5.3.7 合格的面波波形示例

6 数据处理与分析

6.1 一般规定

6.1.1 检测作业结束后，应对数据文件和现场记录等原始资料进行整理。

6.1.2 数据文件的整理应符合下列规定：

- 1 对数据文件应按场地、试验内容、测线进行分类存储备份；
- 2 数据文件不得修改和删除；
- 3 对测点的坐标和高程应进行校核，形成地形文件；
- 4 数据文件整理完毕后应及时归档。

6.1.3 现场记录应包括采集记录表和病害信息汇总表等，并应符合下列规定：

- 1 记录应进行分类和装订成册；
- 2 记录应进行校核和校对，记录修改应采用杠改的方式；
- 3 纸质记录整理完毕后应及时归档。

6.1.4 数据处理与分析应结合检测区域的地质资料、地上和地下设施及周边工程环境等调查资料进行

6.1.5 数据处理软件的通用功能应符合下列规定：

- 1 具有时窗切除、滤波设计等波形处理，以及频谱分析、时频分析等功能；
- 2 具有流程化处理，以及记录、保存处理流程和参数等功能。

6.2 冲击映像法

6.2.1 数据处理软件的专用功能应符合下列规定：

- 1 具有计算指定时间段波形特征值、冲击力修正系数、冲击响应强度等功能；
- 2 具有绘制冲击响应强度比的点布图、分布云图、病害分布图和统计表等功能。

6.2.2 数据处理应包括预处理、波形处理、冲击力修正、冲击响应强度计算，以及指标转换等。

6.2.3 预处理的步骤应符合下列规定：

- 1 剔除无效的原始数据；

- 2 以测线（测点）为单位，整理原始数据，并添加检测点坐标；
- 3 根据检测点坐标，按比例绘制测线（测点）平面布置图；
- 4 应通过快速傅里叶（FFT）变换，获得响应波形的卓越频率和频谱峰值，评价原始数据质量。

6.2.4 波形处理应符合下列规定：

- 1 通过噪音分析，设定利于提取目标波形的时窗；
- 2 设定频率滤波器和方向滤波器等，去除干扰信号；

6.2.5 冲击力基准值和冲击力修正系数应按式（6.2.5-1）和式（6.2.5-2）计算：

- 1 冲击力基准值，应按式（6.2.5-1）进行计算：

$$K_0 = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=b, j=a} K_{ij}}{N} \quad (6.2.5-1)$$

式中： K_0 ——冲击力基准值（N）；

i, j ——第 i 行第 j 列检测点的位置编号， $i=1, 2, \dots, b$ ； $j=1, 2, \dots, a$ ；

K_{ij} ——第 i 行第 j 列检测点的冲击力（N）；

N ——测区测点总数， $N=a \cdot b$ ， a 为单测线的测点数、 b 为测线数。

- 2 冲击力修正系数，应按式（6.2.5-2）进行计算：

$$k = \frac{K_0}{K_{ij}} \quad (6.2.5-2)$$

式中： k ——检测点冲击力修正系数。

条文说明

机械冲击震源的冲击力输出较稳定，人工锤击震源的冲击度具有一定的离散性。通过冲击力度修正，能够有效消除力度偏差的影响。

6.2.6 归一化冲击响应强度应按式（6.2.6-1）~式（6.2.6-3）计算：

- 1 冲击响应强度应按式（6.2.6-1）计算：

$$A = k \cdot \sum_{s=1}^{s=n} |F_s| \quad (6.2.6-1)$$

式中： A ——检测点的冲击响应强度（m/s）；

s ——记录时长内的采样点数， $s=1, 2, \dots, n-1, n$ ；

n ——采样点数;

F_s ——某一采样点的实测数值, 为响应波形的振幅 (m/s)。

2 冲击响应强度基准值应按式 (6.2.6-2) 计算:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=b, j=a} A_{ij}}{N} \quad (6.2.6-2)$$

式中: A_0 ——冲击响应强度基准值, 为无病害路段冲击响应强度的平均值 (m/s)。

3 冲击响应强度比应按式 (6.2.6-3) 计算:

$$I = \frac{A}{A_0} \quad (6.2.6-3)$$

式中: I ——检测点的冲击响应强度比。

条文说明

不同道路的结构厚度、材料、养护水平和技术状况不一样, 实测的冲击响应强度存在离散性。将无病害路段的冲击响应强度作为基准值, 与实测的冲击响应强度进行归一化处理, 消除道路结构、运行情况各异等的影响。

6.2.7 病害判定准则, 应符合下列规定:

- 1 当 $I \leq 1.25$ 时, 判定为无病害;
- 2 当 $1.25 < I \leq 2.0$ 时, 判定为一般疏松;
- 3 当 $2.0 < I \leq 2.5$ 时, 判定为严重疏松;
- 4 当 $I > 2.5$ 时, 判定为脱空。

条文说明

道路设计、施工、运行和养护情况, 以及地域环境各异, 不同路段的冲击响应强度比存在离散性。编制组通过大量试验结果的计算分析, 获得以冲击响应强度比为指标的病害判定标准。

6.3 高密度面波法

6.3.1 数据处理软件的专用功能应符合下列规定:

- 1 具有去除噪音干扰, 只保留有用的面波信息的功能;
- 2 具有频散分析、反演分析、指标转换等功能;

3 具有绘制剪切波速度分布图、病害分布图和统计表等功能。

6.3.2 数据处理应包括预处理、波形处理、频散分析、反演分析、构造分析和病害识别等。

6.3.3 数据预处理应按下列步骤进行：

- 1 剔除无效的原始数据；
- 2 以测线为单位，整理原始数据，并添加坐标信息；
- 3 根据坐标信息，按比例绘制测线平面布置图；
- 4 利用各排列间重复的地震道，将独立采集的各排列数据连接起来，合成覆盖全测线的共激发点大排列。

6.3.4 波形处理应符合下列规定：

- 1 通过噪音分析，设定利于提取目标波形的时窗；
- 2 设定频率滤波器和方向滤波器等，去除干扰信号，只保留面波信息。

6.3.5 频散分析应符合下列规定：

1 宜选用频率-波数方法、高分辨率-波数方法或空间自相关方法等提取面波的频散曲线，并应符合下列规定：

1) 将覆盖整条测线的大排列重新分段，各段之间有一部分相互重合，并对每段分别进行频散曲线提取；

- 2) 应在 $f-K$ 域中提取频散曲线；
- 3) 二维滤波计算应突出基阶面波能量；
- 4) 应在 $f-K$ 域确认基阶面波频散曲线；
- 5) 应将速度-波长域频散曲线转换为速度-深度域频散曲线；
- 6) 频散曲线提取完毕后应进行存储。

2 频散曲线的分层应依据拐点、斜率及频散点疏密等特征确定，并计算各层的面波波速；

3 用于计算地层面波速度的频散曲线应具有收敛的特征，不收敛段的起始拐点可解释为地层界线；

4 应结合现场调查资料和已有的钻探、物探资料等，分析频散曲线的曲率变化。

6.3.6 反演分析应符合下列规定：

- 1 反演分析时，应将地层面波波速转换为剪切波波速；
- 2 宜按由浅及深、逐层调试的原则，择固定层厚度方式计算剪切波速度，使正、反演结果逐渐逼近；

- 3 地层的剪切波波速应按下列公式计算：

$$v_s = \frac{v_R}{\eta_s} \quad (6.3.6-1)$$

$$\eta_s = \frac{0.87+1.12\mu_d}{1+\mu_d} \quad (6.3.6-2)$$

式中： v_s ——地层的剪切波波速（m/s）；

v_R ——地层面的波波速（m/s）；

η_s ——面波与剪切波波速换算系数；

μ_d ——地层的泊松比。

- 4 地层的动力学参数应按下列式计算：

$$G_d = \rho v_s^2 \quad (6.3.6-3)$$

$$E_d = 2(1 + \mu_d)\rho v_s^2 \quad (6.3.6-4)$$

式中： G_d ——动剪切模量（Pa）；

ρ ——质量密度（kg/m³）；

E_d ——动弹性模量（Pa）；

- 5 地层的泊松比应按下列式计算：

$$\mu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (6.3.6-5)$$

式中： v_p ——地层的纵波波速（m/s）。

- 6 按半波长法进行深度转换，并应按地层泊松比进行系数校正，绘制速度-深度曲线；

- 7 应按相速度-深度曲线绘制彩色相速度-深度云图，并符合下列规定：

- 1) 频散曲线上不合理的数据点应剔除；
- 2) 应根据地形文件进行地形校正；
- 3) 应能设置合适的比例尺和波速标尺门限；

8 有钻孔资料时，应结合已知资料确定层厚度和各层的剪切波速度。

6.3.7 构造分析应符合下列规定：

- 1 应依据频散曲线的分层结果进行地层构造分析；
- 2 分析深度应依据面波波长换算；
- 3 应根据同点位、同深度映像的速度值与地层的关系，逐层确认划分，绘制构造分析图；
- 4 有钻孔或其他物探资料时，应结合相关地质资料进行综合分析。

6.3.8 病害识别应符合下列规定：

- 1 宜根据剪切波速度剖面特征，对道路地下隐性病害进行解释。
- 2 具备工程地质或勘探资料的，可将剪切波速度转换成标准贯入度等指标，进行病害解释。
- 3 地下隐性病害的面波法特征见表 6.3.8。

表 6.3.8 地下隐性病害的特征

病害类别	面波相速度	剪切波速度剖面特征	时间域特征	频率域特征
空洞	与周边正常地层相比，速度降低明显	与周边正常地层相比，表现为明显的低速异常，圈闭特征明显	边界波组杂乱，局部存在镜像波	频散曲线变化剧烈，之字形拐点明显
疏松	与周边正常地层相比，速度降低较明显	与周边正常地层相比，表现为较明显的低速异常	波组杂乱，分布不规则	能量团较分散，频散曲线存在之字形拐点，不易提取完整的频散曲线

条文说明

病害区域的波速显著低于无病害区域，通过波速的差值而非绝对值对病害进行解释。具备工程地质或勘探资料的，应结合既有资料综合分析。

7 病害验证

7.0.1 地下隐性病害检测的测量工作应符合下列规定：

1 测线的起止点、转折点、地形突变点、非均匀分布的各测点、异常点及验证点位，应进行平面和高程测量；

2 测量精度应符合现行行业标准《城市测量规范》CJJ/T8 的有关规定；

3 检测使用的底图比例尺不宜小于 1:1000；

4 宜采用当地城市坐标系。

7.0.2 验证前应进行场地危险源辨识与评价，作业过程中应避开地下管线等市政设施。

7.0.3 宜根据病害类型、场地条件和危害对象的重要性等因素选择验证点。

7.0.4 验证点的数量应符合下列规定：

1 空洞病害、脱空病害应全部验证；

2 疏松病害的验证数量不宜少于总数的 20%，且不宜少于 3 处。

7.0.5 验证方法应符合下列规定：

1 宜选用钻探、挖探、钎探等方法；

2 验证点宜布设在异常反应最强部位或中心部位；

3 当验证病害边界时，宜在边缘处增设验证点

4 当不具备钻探、挖探、钎探等作业条件时，可选用探地雷达等方法进行验证。

7.0.6 当采用钻探法进行验证时，现场作业方法应符合下列规定：

1 应按现行行业标准《建筑工程地质勘探与取样技术规程》JGJ/T87 执

2 每回次钻孔进尺不宜大于 0.3m，宜采取减压、慢速钻进或干钻等方法；

3 宜对疏松病害进行标准贯入试验或动力触探测试；

4 宜采用内窥设备记录病害影像。

7.0.7 成果验证的记录应符合下列规定：

1 钻探验证应记录病害的埋深、净空，以及钻进状态、塌孔状态、含水量等信息；

2 钎探验证时应记录每 10cm 的击数及击数突变等信息；

3 挖探验证时应记录病害的横向规模、形态、埋深和净空,以及土体性状等信息。

7.0.8 成果验证结果的判定宜符合下列规定:

1 当钻探、钎探过程中发生掉钻时,宜判定病害类型为空洞或脱空;

2 当钻探过程中钻进速率加快、标准贯入或动力触探击数降低、挖探揭露的土体不密实时,宜判定病害类型别为疏松。

7.0.9 验证完成后应按现行行业标准《建筑工程地质勘探与取样技术规程》JG/T87 的规定进行回填。

7.0.10 应根据验证结果修正检测结论,确定病害的类型、规模及性状等特征。

条文说明

对埋深 2m 以内的浅层隐性病害,采用钻探、内窥镜组合的验证方法,能够直观地看到病害区域内部情况。

8 成果与报告

8.1 一般规定

8.1.1 道路地下隐患病害检测成果应该包括成果图件和文字报告。

8.1.2 成果图件应层次清晰，图式、图例、标记和比例尺等要素齐全。

8.1.3 文字报告的文字、术语、代号、符号、数字和计量单位等，均应符合国家现行有关标准的规定。

8.2 成果图件

8.2.1 地下隐性病害成果表应包括病害编号、里程桩号、车道编号、病害特征等，记录宜符合本规程附录 B 的规定。

8.2.2 成果图件应包括检测工作布置图、地下隐性病害平面分布图、成果解释图等。

8.2.3 检测工作布置图应按本规程附录 C 的规定，采用统一的代号和图例编制，并应符合下列规定：

- 1 应标明测线、测点、验证点、起止点等的平面位置和编号；
- 2 连续测线应在测线的起止点、转折点、地形突变点以及其他重要的点位设置测线特征点，当测线太长没有特征点时宜设置测点标记；
- 3 测线特征点、测点等的编号宜由检测方法代号和阿拉伯数字组成，且同一测区唯一；
- 4 验证工作布置应按规定的代号和图例统一编号绘制。

8.2.4 采用冲击映像法检测的成果图件应包括冲击响应强度比点布图、冲击响应强度比分布云图和病害分布平面图，并应符合下列规定：

- 1 以测区长边方向（纵向）为横轴，短边方向（横向）为纵轴，圆点代表检测点，绘制冲击响应强度比点布图，见图 8.2.4-1。

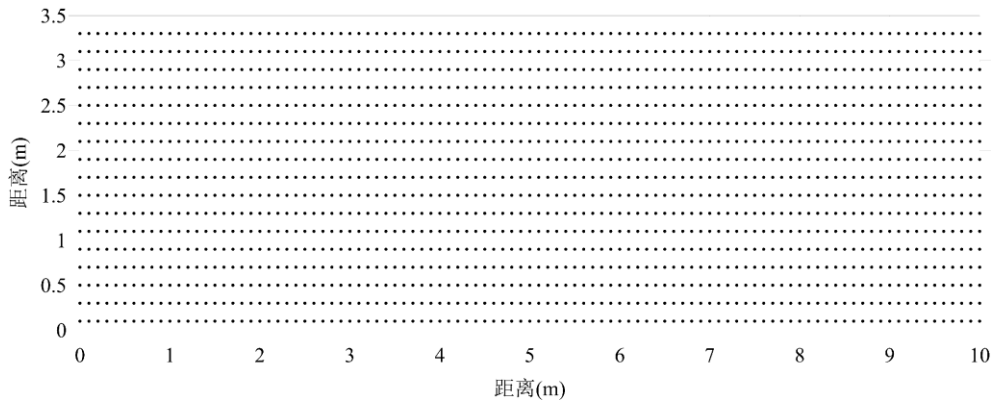


图 8.2.4-1 冲击响应强度比点布图示例

2 将冲击响应强度比点布图进行网格加密和平滑, 绘制冲击响应强度比分布云图, 见图 8.2.4-2。

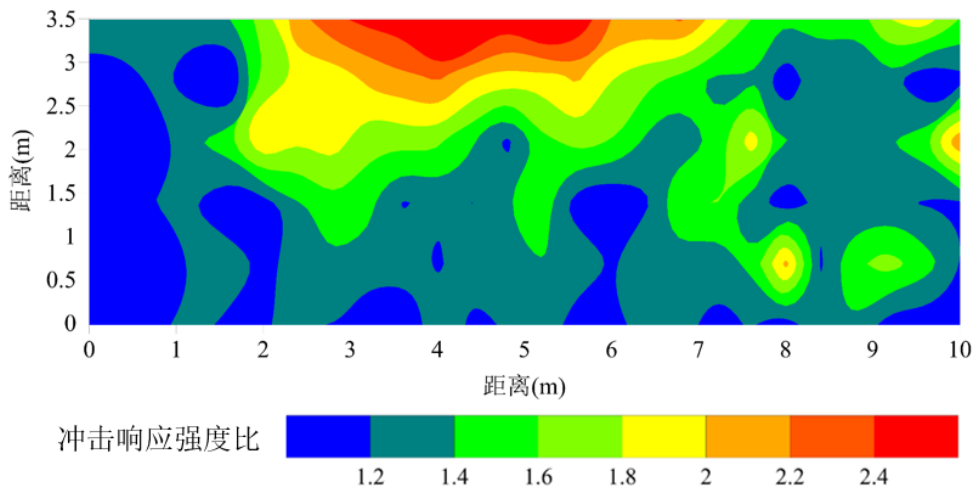


图 8.2.4-2 冲击响应强度比分布云图示例

3 病害平面分布图应按本规范 6.2.7 条的规定绘制, 见图 8.2.4-3。

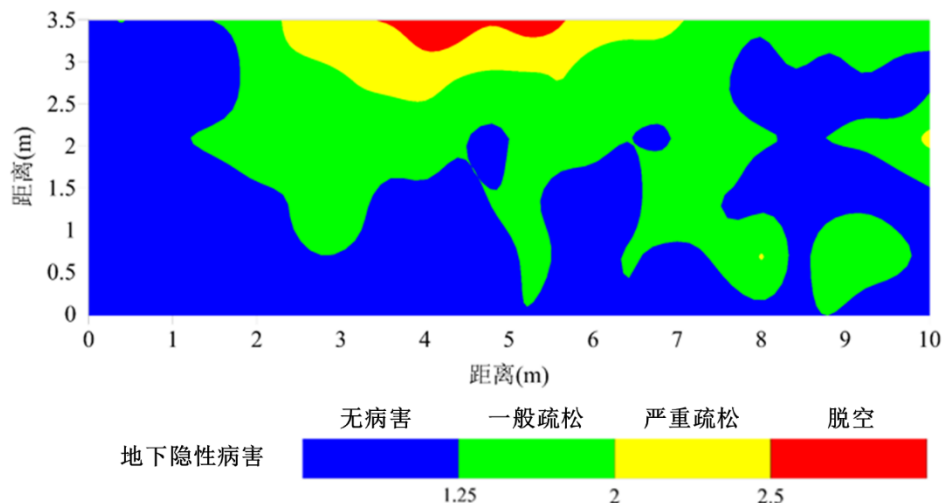


图 8.2.4-3 病害平面分布图示例

8.2.5 采用高密度面波法检测的成果图件应包面波波形记录图、频散曲线图、反演剖面图和病害统计表，并应符合下列规定：

1 以频率为横轴，相速度为纵轴，绘制频散曲线，见图 8.2.5-1.

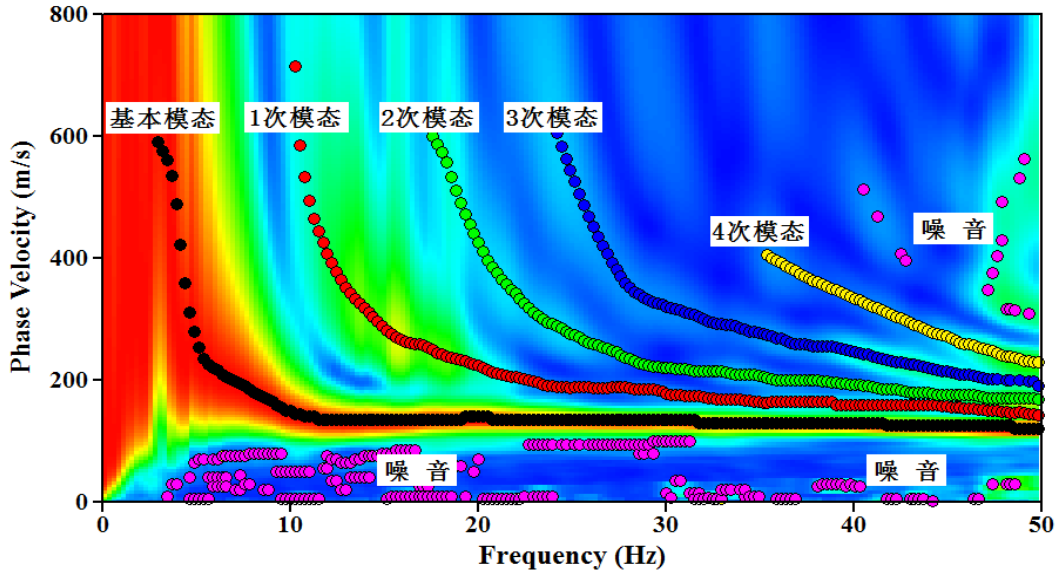


图 8.2.5-1 频散曲线图示例

2 以测线长伟横轴，深度为纵轴，以不同颜色表示剪切波速，绘制反演剖面图，见图 8.2.5-2.

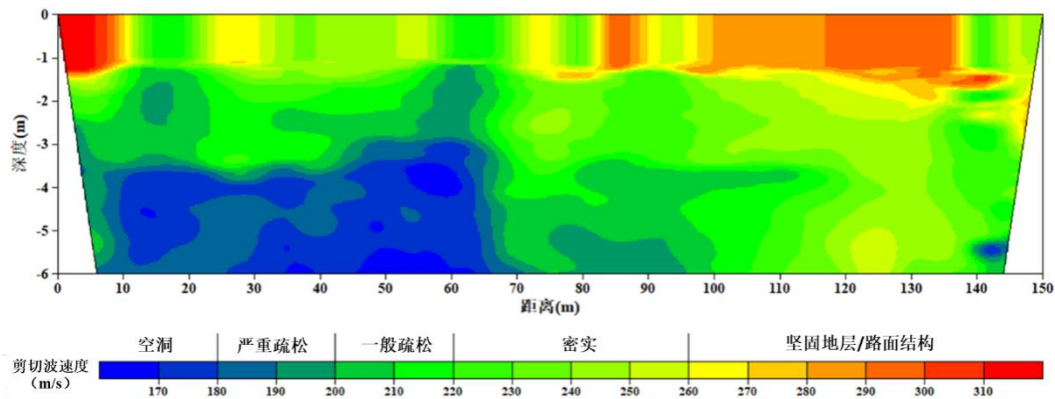


图 8.2.5-2 反演剖面图示例

3 当在检测区域布置多条平行测线时，可将各测线的图像生成拟三维剖面图，见图 8.2.5-3。

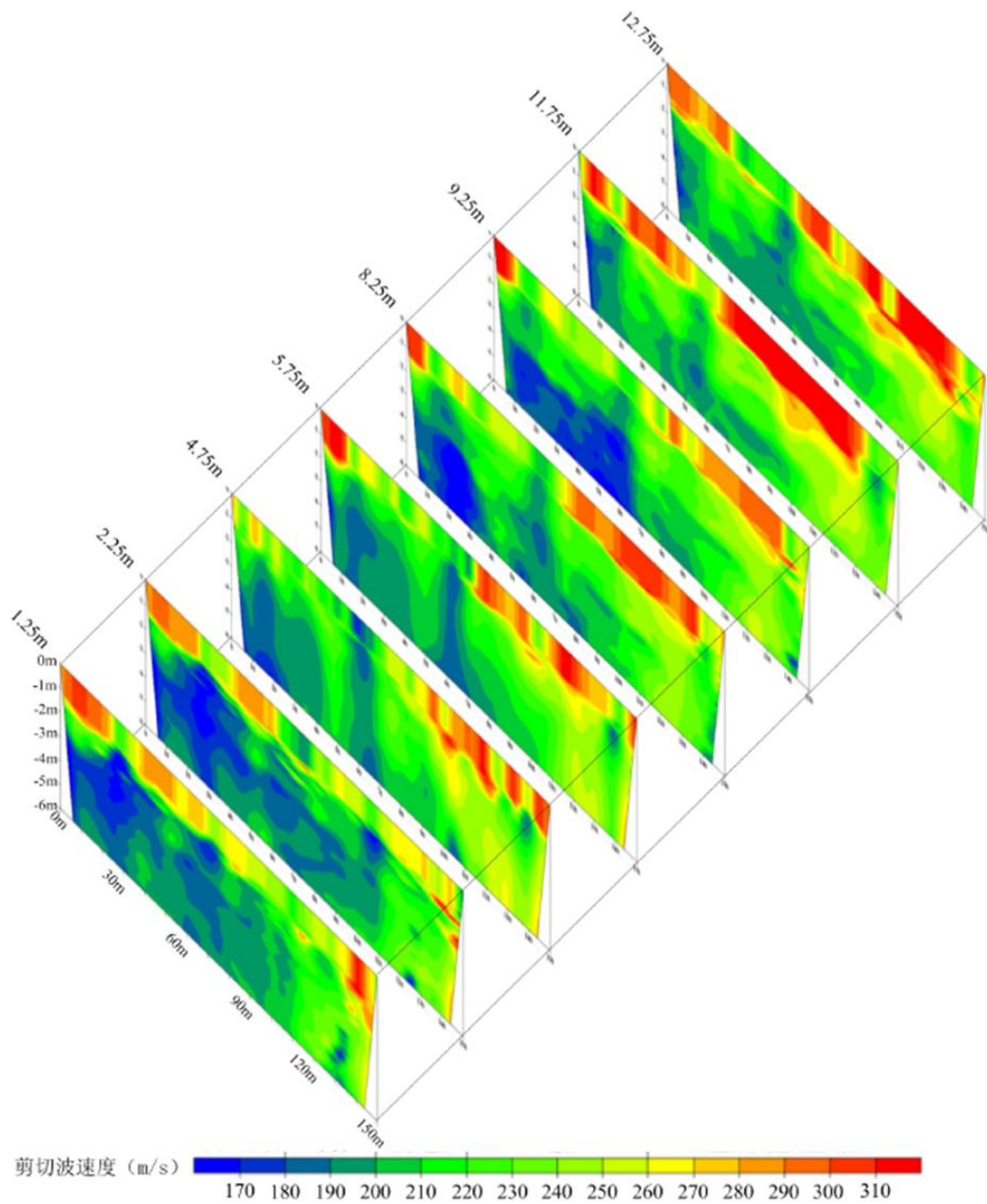


图 8.2.5-3 拟三维剖面图示例

8.3 文字报告

8.3.1 检测报告应详细、清晰、完整地反映检测过程，数据真实、图表清晰、内容完整、结论准确、建议合理。

8.3.2 检测报告应根据任务要求、项目特点和工程地质条件等具体情况编写，并应包括下列主要内容：

- 1 项目概况，宜包括检测路段的建设、养护和改造各阶段资料收集的情况和分析。
- 2 检测目的、任务要求、检测依据，以及测试内容、范围和时间等。

- 3 工程场地的地形、地貌、地质特征和地球物理条件；
- 4 检测工作的重点、难点分析，应对措施与技术路线。
- 5 检测方法，宜包括技术原理、数据采集方法、数据分析方法等。
- 6 检测实施，包括仪器性能、测线（测点）布设、采集参数、工作进度、工作量和质量保障措施等。
- 7 数据处理与分析。
- 8 检测成果分析，应识别、验证地下隐性病害，并描述病害中心位置、面积、埋深和净空等属性信息。
- 9 主要结论与建议。
- 10 附图和附表，应包括成果图件。

附录 C 地下隐性病害检测成果代号和图例

表 C 地下隐性病害检测成果代号和图例

名称		代号	图例	说明
检测方法 及验证点	冲击映像法	CJ	 <p>以冲击映像测线为例</p>	<p>1 测点、测线特征点用直径 0.5mm 实心圆表示；</p> <p>2 连续测线用线宽 0.2mm 实线连接测线特征点表示</p>
	高密度面波法	GM		
	验证点	YZ		
地下隐性 病害类型	空洞	KD		<p>1 范围线用线宽 0.3mm 实线表示, 不同来写病害可用不同内容填充；</p> <p>2 中线位用 1mm 圆表示</p>
	脱空	TK		
	严重疏松	YS		
	一般疏松	YB		