

广西壮族自治区地方标准

DB45/T 2419—2021

钻孔管波探测技术规程

Technical code of practice for borehole tube wave detection

2021-12-20 发布

2022-01-20 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 基本规定	3
6 仪器设备	4
7 工程勘察应用	5
8 基桩检测应用	7
附录 A（资料性）钻孔管波探测技术理论	10
附录 B（资料性）综合解释成果图示例	12
附录 C（资料性）现场记录表格	14
附录 D（资料性）钻孔管波探测技术成果图格式	16
参考文献	17

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文件可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西壮族自治区交通运输厅提出并宣贯。

本文件由广西交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：广西交通工程检测有限公司、广西交通设计集团有限公司、广西新发展交通集团有限公司、桂林矿产地质研究院工程有限公司、广东省地质物探工程勘察院。

本文件主要起草人：罗彦、吴庆全、何廷全、张玉池、李学文、李敦仁、唐正辉、林芳鹏、李祖能、潘荣建、毛承英、王宗学、黄志华、章哲辉、毛志新、欧鸥、韦丘德、黄家华、李勤武、陈晋荣、韦景麒、梁安、甘力、黄勇钧、李志民。

钻孔管波探测技术规程

1 范围

本文件界定了钻孔管波探测技术涉及的术语和定义、符号，规定了基本要求、仪器设备、工程勘察应用、基桩检测应用的要求。

本文件适用于广西行政区域内建设工程中应用钻孔管波探测技术进行的工程勘察及基桩检测。

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 50021 岩土工程勘察规范
JGJ 106 建筑基桩检测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

管波 tube wave

井液及孔壁分界面沿钻孔轴向传播的广义瑞利波。

3.2

管波探测技术 borehole tube wave detection

利用管波探测目标体的地球物理方法，简称“管波法”，方法原理见附录A。

3.3

工程勘察 geotechnical investigation

利用管波法探测溶洞、溶蚀裂隙、软弱夹层等不良地质体岩，为评价工程岩土性质提供依据。

3.4

基桩检测 pile test

利用管波法检测基桩的完整性和桩端持力层岩土性状。

3.5

现场试验 field test

为确定有效的采集参数，在正式采集数据前进行的测试。

3.6

直达波 direct wave

由激发点沿井壁直接传播至接收点的管波。

3.7

反射波 reflected wave

传播过程中遇到波阻抗差异界面发生反射的管波。

3.8

波阻抗 wave impedance

介质密度与波速的乘积。

3.9

下行反射波 down-going wave

遇到波阻抗差异界面向下反射的管波。

3.10

上行反射波 up-going wave

遇到波阻抗差异界面向上反射的管波。

3.11

增益 gain

表示信号放大的程度，用dB表示。

3.12

同相轴 event

波形记录上来自同一信号源的各道相同相位的连线。

4 符号

下列符号适用于本文件。

4.1 管波特性参数

A ——管波的幅值 (mV)；

Q ——能量指标 (mV)；

T ——管波周期信号 (s)；

v ——管波的波速 (m/s)；

f_r ——管波接收信号的主频值 (Hz)；

f_0 ——管波激发源的中心频率 (Hz)；

t_d ——直达波走时 (s)；

v_d ——直达波波速 (m/s)；

λ ——管波的波长 (m)。

4.2 几何参数

D ——桩径 (m)；

R ——管波探测范围的半径 (m)；

l_0 ——收发换能器的距离 (m)；

H ——测点的深度 (m)。

4.3 其他

N ——表示某一段时间内有 N 个采样点；

PSD——能量—深度曲线上相邻两点的斜率与能量差的乘积。

5 基本规定

5.1 一般规定

5.1.1 钻孔应符合下列规定：

- 测试段灌满水；
- 孔壁光滑、不坍塌、不掉块；
- 孔径大于收发换能器的外径；
- 测试段无金属套管，护壁套管采用塑料套管；
- 套管与井壁的空隙填充液体。

5.1.2 管波法探测范围的半径不宜大于半个波长，应按式（1）计算。

$$R < \frac{1}{2} \lambda = \frac{v}{2f_0} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

- R ——管波探测范围的半径（m）；
- λ ——管波的波长（m）；
- v ——管波的波速（m/s）；
- f_0 ——管波的中心频率（Hz）。

5.2 工作程序

5.2.1 管波法应按图1的程序开展工作。

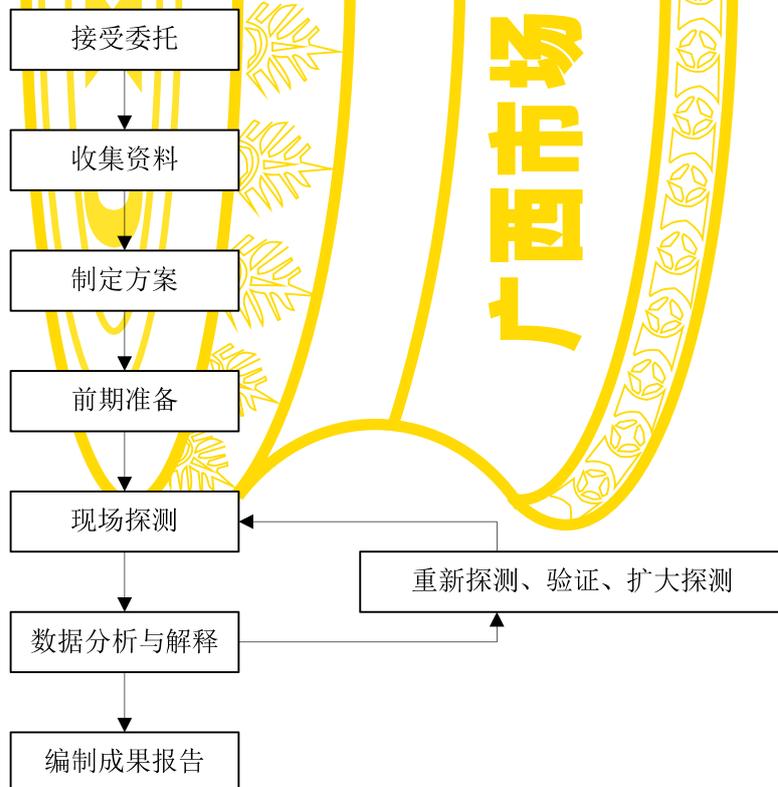


图1 管波法工作流程图

5.2.2 收集资料应包括下列内容：

- 任务目的及具体要求；
- 已有的其他成果资料；
- 现场开展探测工作的可行性。

5.2.3 探测方案应包括下列内容：

- 工程概况；
- 任务来源及目的；
- 预计探测工作量；
- 方法技术及仪器设备；
- 现场准备及人员配备；
- 工作计划及成果提交时间；
- 安全生产和环境保护措施。

5.2.4 前期准备工作应包括内容：

- 在无钻孔的测区提前布设钻孔；
- 钻孔破碎段用塑料套管进行护壁，并详细记录套管安装情况；
- 检查并清洗钻孔，钻孔应符合 5.1.1 的规定，钻孔深度应满足任务要求；
- 检查并调试仪器设备，确保其性能正常。

5.2.5 现场探测符合下列规定：

- 正式采集数据前宜进行现场试验，确定方法的有效性 & 采集参数合理性；
- 同一钻孔内的仪器采集参数应保持一致；
- 应采用发射换能器和接收换能器距离恒定的、测点间距恒定的自激自收的观测系统；
- 宜以发射换能器和接收换能器连线的中点作为记录点，自下而上逐点测试，匀速提升；
- 换能器提升过程中，应校核测绳刻度和采集深度；
- 数据采集完成后应及时保存并备份数据，详细完整地填写原始记录，记录表格可参照附录 C；
- 数据采集过程中出现连续漏点、波形畸变等情况时，应重新采集数据，并做好记录。

5.2.6 数据分析及解释应符合下列规定：

- 数据处理时不得进行道间振幅归一化处理，可进行滤波处理、深度校正；
- 同一测试孔各测点的测试曲线应采用相同的显示增益，可采用伪彩色剖面显示；
- 时间剖面图应与钻孔柱状图绘制在同一成果图件中，并采用同一深度比例尺，可参照附录 D；
- 数据解释应按照先已知后未知、先易后难的原则进行；
- 在分层并确定其深度的基础上，对管波法结果进行解释；
- 对可疑异常区进行加密复测；
- 结合钻探资料和其他探测成果进行综合分析、验证。

5.2.7 编制成果报告应符合下列规定：

- 内容全面，重点突出，立论有据，结论明确，图表清晰；
- 项目进行阶段可根据工程需要编制满足委托方要求的阶段性报告或中间成果，待项目完成后应及时提交最终成果报告。

6 仪器设备

6.1 管波法探测仪包含主机、换能器，使用时仪器设备应在校准或检定有效期内。

6.2 主机应符合下列要求：

- 防潮、防爆、防摔，绝缘性能好；

- 具备波形实时显示、记录和存储功能；
- 最小采样时间间隔不大于 0.02 ms，记录仪器频带范围为 100 Hz~3 000 Hz，A/D 转换器不小于 16 bit；
- 信号幅值量程不小于±5 V，幅值测量相对误差应小于 10%；
- 具有自动记录深度的功能，测量相对误差不大于 0.5%。

6.3 孔内换能器应包括发射换能器、接收换能器和井下电缆，并应符合下列要求：

- 探测过程中发射换能器与接收换能器的距离恒定；
- 电缆应有深度标志且深度误差不应大于 0.5%，电缆应牢固耐磨；
- 换能器在 1 MPa 水压下能正常工作；
- 发射换能器采用低频孔中换能器，发射能量不小于 10 J，发射的管波峰值频率应处于 500 Hz 至 1 000 Hz 之间；
- 接收换能器应采用灵敏度不小于 3 000 $\mu\text{V}/\text{Pa}$ 的水听器。

7 工程勘察应用

7.1 一般规定

- 7.1.1 管波法在工程勘察中适用于探测溶洞、溶蚀裂隙、软弱夹层等不良地质体。
- 7.1.2 管波法的探测孔深度应符合 GB 50021 中对勘探孔深度的规定。

7.2 现场探测

- 7.2.1 现场探测应符合 5.2.5 的规定。
- 7.2.2 探测孔应符合 5.1.1 的规定，对存在溶洞、破碎岩层的测试段宜安装塑料套管进行护壁。
- 7.2.3 现场数据正式采集前宜选择有不良地质体揭露的钻孔进行现场试验，确定采集参数。
- 7.2.4 测点间距不宜大于 0.1 m，对可疑异常段宜加密复测。
- 7.2.5 探测记录的采样时间间隔不应大于 0.02 ms，记录长度不应小于 25 ms。

7.3 数据分析及解释

- 7.3.1 数据分析与解释前应先排除孔底、孔口、孔液面、地层变化、孔径变化、套管等因素引起的干扰异常，确定其影响程度，避免误判。
- 7.3.2 按式 (2) 计算直达波波速。

$$v_d = \frac{l_0}{t_d} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- v_d ——直达波波速 (m/s)；
- l_0 ——收发换能器的距离 (m)；
- t_d ——直达波走时 (s)。

7.3.3 按式 (3) 计算接收信号的主频值。

$$f_r = \frac{1}{T_r} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- f_r ——管波主频值 (Hz)；

T_r ——管波周期信号 (s)。

7.3.4 按式 (4) 计算接收信号的能量, 绘制能量—深度曲线。

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i)^2 \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- Q ——能量指标 (mV), 约定将某一时间段内的管波时域曲线的幅值平方的平均值作为能量指标;
- N ——表示某一时间段内有 N 个采样点;
- A_i ——某一时间段内第 i 个采样点的幅值 (mV)。

7.3.5 可根据能量—深度曲线绘制 PSD 曲线作为辅助线, PSD 值为曲线上相邻两点的斜率与能量差的乘积, 应按式 (5) 计算。

$$PSD_i = \frac{(Q_i - Q_{i-1})^2}{(H_i - H_{i-1})} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- PSD_i ——第 i 测点的 PSD 值 (mV²/m);
- Q_i ——第 i 测点的能量指标 (mV);
- Q_{i-1} ——第 $i-1$ 测点的能量指标 (mV);
- H_i ——第 i 测点的深度 (m);
- H_{i-1} ——第 $i-1$ 测点的深度 (m)。

7.3.6 结合钻孔地质资料, 依据直达波波速、能量变化、反射波同相轴特征, 按下列方法确定地质分层界面:

- 直达波波速突变点为分层界面;
- 能量—深度曲线和 PSD 曲线上的突变点为分层界面;
- 反射波同相轴起始点为分层界面。

7.3.7 在确定地质分层的基础上, 对钻孔管波探测结果进行地质解释及推断

7.3.8 地质解释应根据管波的波速、能量和频率, 结合钻孔柱状图, 按照表 1 的要求进行, 可参考附录 B.1。

表1 地质特性及管波特征

地质特性	管波特征描述
第四系土层	直达波速度低、同相轴弯曲、能量弱; 底界面向外反射波同相轴明显、能量强、频率低; 层内反射波同相轴不明显、能量弱且衰减明显
软弱夹层	直达波速度低、同相轴弯曲、能量弱; 层外反射波同相轴明显、能量强、频率低, 呈“八”字型; 层内反射波同相轴不明显, 能量弱且衰减明显
岩洞发育段	直达波能量弱或看不见; 层外反射波同相轴明显、能量强、频率低, 呈“八”字型; 层内反射波能量弱或看不见
溶蚀裂隙发育段	直达波速度稍低、同相轴不连续、能量稍弱; 层内反射波同相轴不连续、能量低、频率较高, “X”字型特征不明显

表1 地质特性及管波特征（续）

地质特性	管波特征描述
节理裂隙发育段	直达波速度较高、同相轴可能不连续、能量较强； 层内反射波能量强、频率高，多条同相轴相交叉，“X”字型特征不明显
完整岩石	直达波速度高、同相轴连续且平直、能量强； 层内反射波同相轴连续、能量强且无明显衰减、频率高，“X”字型特征明显，并可能多次出现
注1：层外反射波是相邻地层为完整岩石时，上界面产生的上行反射波和下界面产生的下行反射波。	
注2：层内反射波是指与相邻地层存在波阻抗差异时，上界面产生的下行反射波和下界面产生的上行反射波。	

7.3.9 成果报告除符合 5.2.7 规定外，尚应包括下列内容：

- 项目概况；
- 任务目的及要求；
- 地质概况及地球物理特征；
- 工作方法技术；
- 数据分析及解释；
- 结论及建议；
- 附录。

8 基桩检测应用

8.1 一般规定

8.1.1 管波法适用于检测基桩的桩身完整性、桩底沉渣厚度和桩端持力层岩土性状。

8.1.2 检测桩身完整性时，应给出每根受检桩的桩身完整性类别。桩身完整性类别评判应符合表 2 的规定。

表2 桩身完整性分类表

桩身完整性类别	分类原则
I 类	桩身完整
II 类	桩身有轻微缺陷，不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III 类	桩身有明显缺陷，对桩身结构承载力有影响
IV 类	桩身存在严重缺陷
注：引用 JGJ 106。	

8.1.3 当受检桩出现 III 类桩、IV 类桩、桩底沉渣厚度和持力层岩土性状不满足设计要求时，应分析原因并扩大检测，扩大检测的方案和数量应得到工程建设有关方的确认。

8.2 现场检测

8.2.1 现场探测应符合 5.2.5 的规定。

8.2.2 受检桩的桩身混凝土强度不得低于设计强度的 70% 且不得小于 15 MPa。

8.2.3 检测预应力管桩时，可将清洗干净的桩孔作为探测孔；检测混凝土灌注桩时，可将钻芯孔或桩内预埋管作为探测孔。探测孔应符合 5.1.1 的规定。

- 8.2.4 检测数量不应少于总桩数的 10%，且不少于 10 根。
- 8.2.5 检测混凝土灌注桩时，受检桩的探测孔数量和位置应符合下列规定：
 - 桩径小于 1.2m 的桩的孔数可为 1 个~2 个，桩径为 1.2m~1.6 m 的桩的孔数宜为 2 个，桩径大于 1.6 m 的桩的孔数宜为 3 个；
 - 对桩身完整性、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测时，探测孔可为 1 个孔；
 - 当孔数为 1 个时，宜在距桩中心 10 cm~15 cm 的位置布孔；当孔数为 2 个或 2 个以上时，宜在距桩中心 0.15 D~0.25 D 范围内均匀对称布孔。
- 8.2.6 检测桩身完整性和桩底沉渣厚度时，探测孔深度应超过设计桩底不少于 1.0m；检测桩端持力层岩土性状时，探测孔深度超过设计要求的持力层深度不少于 1.0 m。
- 8.2.7 检测桩身完整性和桩端持力层时，测点间距不宜大于 0.1m，对可疑异常区应加密复测；检测桩底沉渣厚度时，测点间距不宜大于 0.05 m。
- 8.2.8 检测记录的采样时间间隔不应大于 0.020 ms，记录长度不应小于 25 ms。

8.3 数据分析与解释

- 8.3.1 数据分析应符合本文件 7.3.1~7.3.5 的规定。
- 8.3.2 按照设计文件、施工记录和钻孔资料对基桩进行分层，确定桩端持力层、桩底沉渣层和混凝土桩身层，按照 7.3.6 确定分层界面，在分层的基础上进行数据分析与解释。
- 8.3.3 检测桩端持力层岩土性状时，宜按表 1 对持力层进行地质解释，并依据设计要求进行评价。
- 8.3.4 检测桩底沉渣厚度时，宜按表 1 中软弱夹层的管波特征识别桩底沉渣层，计算其厚度，并依据设计要求进行评价。
- 8.3.5 检测混凝土桩身完整性时，应结合波速、振幅及主频等参数，按表 3 对桩身缺陷的分布、程度进行综合判断，可参考附录 B.2。

表3 桩身缺陷程度及管波特征

桩身缺陷程度	管波特征
严重缺陷	直达波速度低，同相轴向下弯曲，能量弱或不可见； 层外反射波同相轴明显、能量强、频率低，“八”字型特征明显； 层内反射波能量弱或不可见
明显缺陷	直达波速度稍低，同相轴向下弯曲，能量较弱； 层外反射波同相轴较明显、能量较强、频率较低，“八”字型特征明显； 层内反射波同相轴不连续、能量弱
轻微缺陷	直达波速度较高，同相轴平直，能量较强； 层外反射波同相轴不明显、能量弱，无明显“八”字型特征； 层内反射波同相轴连续、能量较强
桩身完整	直达波速度高，同相轴平直，能量强； 承诺书反射波同相轴连续、能量强且无明显衰减、频率高
注1：层外反射波是相邻地层为完整混凝土时，上界面产生的上行反射波和下界面产生的下行反射波。	
注2：层内反射波是指与相邻地层存在波阻抗差异时，上界面产生的下行反射波和下界面产生的上行反射波。	

- 8.3.6 桩身完整性类别的判定应结合缺陷程度、缺陷分布，按表 2 和表 4 进行综合分析判定。

表4 桩身完整性类别判定

桩身完整性类别	特征
I类桩	无缺陷段； 存在轻微缺陷，但管波异常点纵向分布不连续
II类桩	存在轻微缺陷，管波异常点纵向分布连续； 存在明显缺陷，但管波异常点纵向分布不连续
III类桩	存在明显缺陷，管波异常点纵向分布连续； 存在严重缺陷，但管波异常点纵向分布不连续
IV类桩	存在严重缺陷，管波异常点纵向分布连续
注：完整性类别由IV类往I类依次判定。	

8.3.7 钻孔管波探测技术难以对桩身完整性类别进行判定时，应结合其他方法的检测结果进行综合判定。

8.3.8 成果报告除符合 5.2.7 规定外，还应包括下列内容：

- 工程概况；
- 任务与目的；
- 执行标准；
- 抽检数量及原则；
- 方法技术及要求；
- 数据分析及判定；
- 结论及建议；
- 附录。

附 录 A
(资料性)
钻孔管波探测技术理论

A.1 管波传播特性

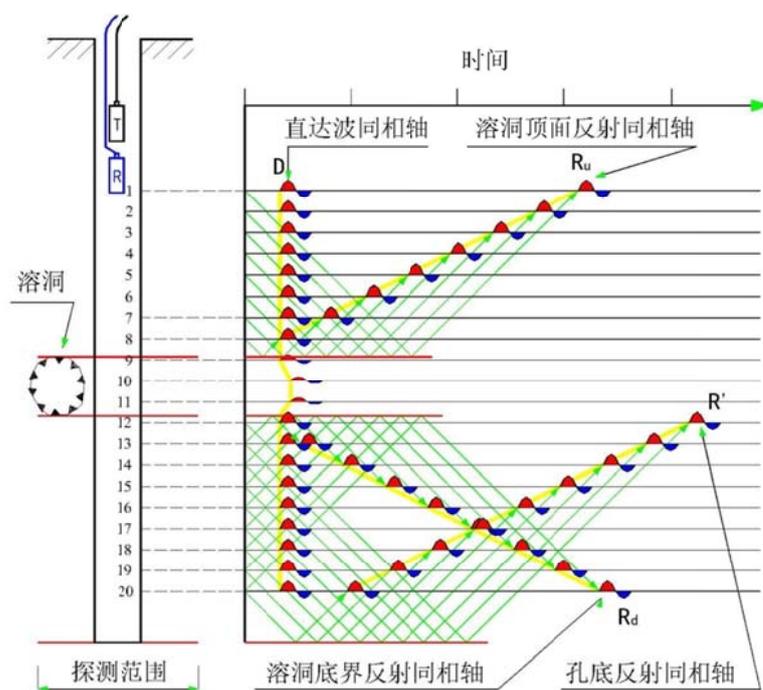
A.1.1 在弹性波理论中,根据波动传播空间的不同,通常将弹性波分为体波和面波。体波在无限空间中传播,包括横波和纵波;面波在波阻抗差异界面附近传播,包括瑞利波、斯通利波和勒夫波。当相互接触的两种介质分别为液体和固体时,液体中的振动会在介质分界面处产生沿界面传播的面波,称为广义的瑞利波。而在填充液体的孔内和孔壁上,广义瑞利波沿钻孔轴向方向传播,称作管波。常见管波有两种:一种是斯通利波,沿孔壁传播,并在围岩中呈指数衰减;另外一种为准瑞利波(又称为伪瑞利波),它是一种导波,大部分能量集中在流体内,在围岩中呈指数衰减。本规程中钻孔管波探测技术使用的管波实质为斯通利波。

A.1.2 管波在固液分界面沿钻孔轴向方向传播,质点的运动轨迹为前推式的椭圆,其传播具有能量衰减慢、频率变化小的特点。管波传播过程中遇到波阻抗差异界面时会产生反射波,反射波能量强弱与界面两侧介质的波阻抗差异大小成正相关关系。发生反射的波阻抗界面主要有孔径变化处、孔内液面处、孔底和孔壁波阻抗差异界面处,而孔壁波阻抗差异往往又是孔旁不良地质体或基桩缺陷等因素所引起的。钻孔管波探测技术的实测资料证明,管波的能量与钻孔周围固体介质的横波波速呈现正相关关系,而横波波速由与钻孔周围介质的地质性质或结构完整性有关。

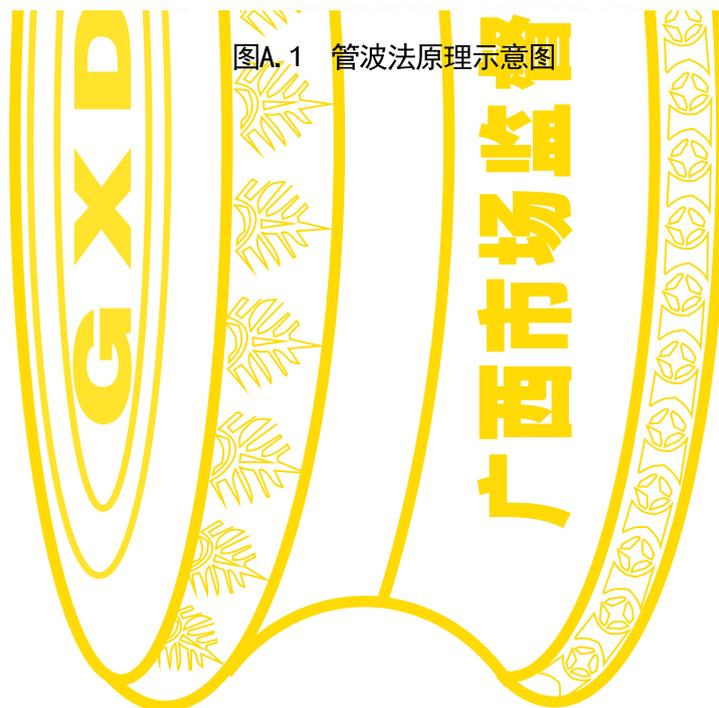
A.1.3 管波的能量主要集中在界面以外半波长范围内,因此管波的探测范围为以钻孔为中心、半波长为半径为圆柱形区域。管波的波速极为稳定,管波探测中可通过改变管波源的频率来改变管波的探测范围。

A.2 管波法原理

管波法采用单发单收、收发距固定的单孔探测装置,如图A.1所示。发射换能器和接收换能器以恒定间隔置于同一个钻孔中,发射换能器激发一定频率的脉冲信号,在井液和孔壁分界面产生管波,管波沿钻孔轴向传播,遇到波阻抗差异界面产生反射波,接收换能器接收直达波和反射波,最终由管波探测仪主机存储并显示。将发射换能器和接收换能器以固定间距移动,逐点采集不同深度的数据,并将采集的波形记录按深度排列,得到管波探测的时间剖面。通过分析时间剖面信号直达波和反射波的波速、振幅(能量)、频率等参数性质,推断出钻孔周围不良地质体的分布情况或基桩完整性情况。



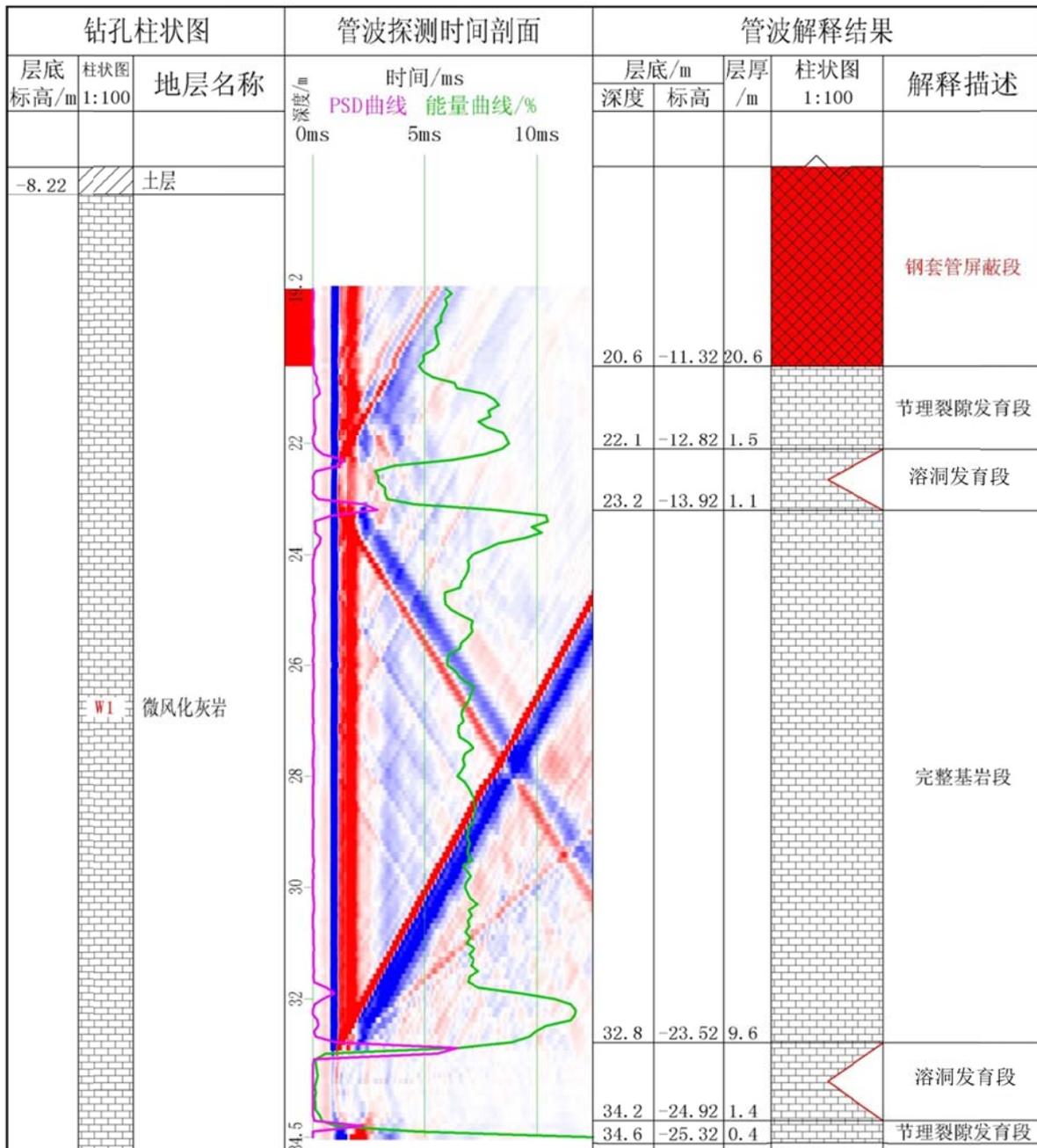
图A.1 管波法原理示意图



附录 B
(资料性)
综合解释成果图示例

B.1 管波法用于工程勘察的综合解释成果图示例

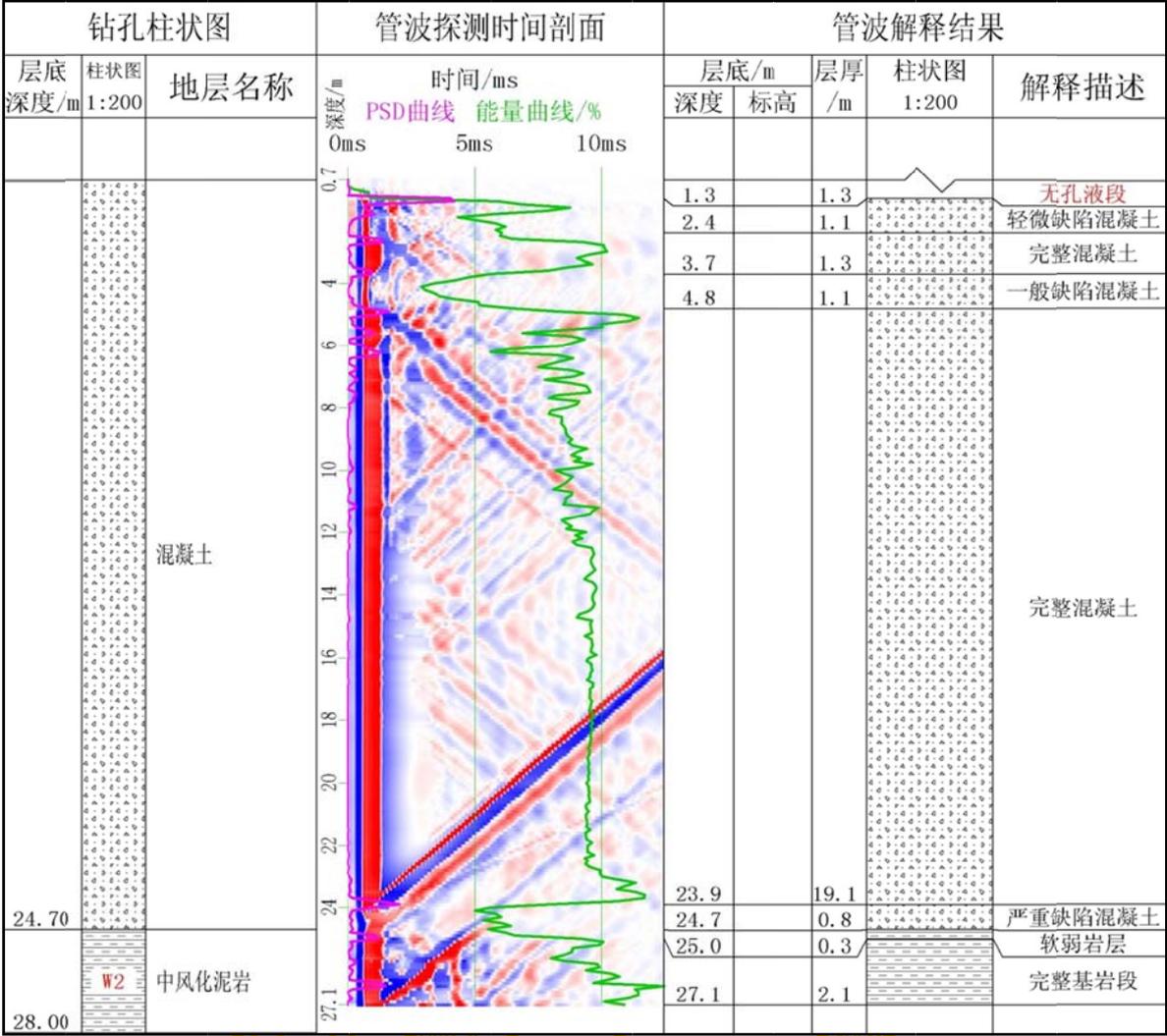
如图B.1。



图B.1 工程勘察综合解释成果图示例

B.2 管波法用于基桩检测的综合解释成果图示例

如图B.2。



图B.2 基桩检测综合解释成果图示例

附 录 D
(资料性)
钻孔管波探测技术成果图格式

管波法的成果图格式见表D.1。

表D.1 钻孔管波探测技术的成果图格式

项目名称					
桩号		钻孔编号		钻孔深度 (m)	
孔口高程 (m)		探测深度 (m)		测试日期	
钻孔柱状图		管波探测时间剖面图		管波解释结果	
层面标高 (m)	芯样描述			层界标高 (m)	解释描述

测试:

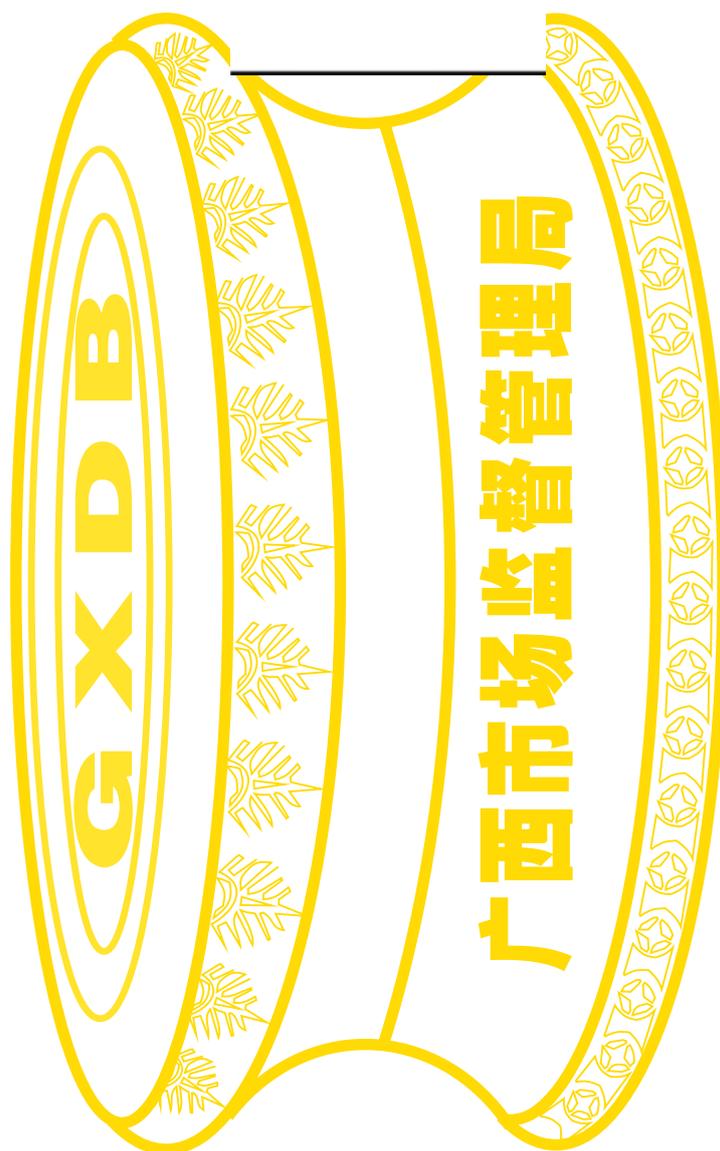
编制:

复核:

审核:

参 考 文 献

- [1] CJJ/T 7—2017 城市工程地球物理探测标准
- [2] JTG/T 3222—2020 公路工程物探
- [3] DBJ45/024—2016 岩溶地区建筑地基基础技术规范
- [4] DBJ/T45-066—2018 广西壮族自治区岩土工程勘察规范



中华人民共和国广西地方标准

钻孔管波探测技术规程

DB 45/T 2419—2021

广西壮族自治区市场监督管理局统一印刷

版权专有 侵权必究