

ICS 点击此处添加 ICS 号
点击此处添加中国标准文献分类号

DB

地 方 标 准

DB XX/ XXXXX—XXXX

钻孔管波探测技术规范

Technical code for detection using tube wave

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

（征求意见稿）

前 言

根据桂建标[2019]21 号文的要求，规程编制组在广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际先进标准，并在广泛征求意见的基础上，按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则，制定了本规程。

本规程的主要技术内容是：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 仪器设备与处理软件；5 现场采集；6 数据资料处理与分析；7 成果报告。

本规程由 负责管理，由主编单位负责具体技术内容的解释。

本规程主编单位：南宁市建筑科学研究设计院、桂林矿产地质研究院工程有限公司。

本规程参编单位：广东省地质物探工程勘察院

桂林理工大学

广西有色勘察设计研究院

广西壮族自治区建筑工程质量检测中心

广西祥明工程检测咨询有限责任公司

广西建通工程质量检测有限公司

南宁市大大居建筑科技有限责任公司

广西鼎恒工程质量检测有限公司

广西万众工程检测有限公司

中国建筑第二工程局有限公司

本规程主要起草人员：黄 赞、张玉池

李学文、冯秋露、何 辉、马锦国、赵克菲、毛志新、蒋玉柳、吕玉增
丁彦礼、马富安、翁敦贤、梁金福、沈园园、滕 冰、青大凯、蒋玉治
何建兴、方荣增、刘海标、薛赐林、陈 凡、谢丰阳、朱 亮、刘文烈
陶天恒

目 次

1	总则
2	术语与符号
2.1	术语
2.2	符号
3	基本规定
4	仪器设备和处理软件
4.1	仪器设备
4.2	处理软件
5	现场采集
5.1	一般规定
5.2	正式采集
5.3	采集记录质量评价
6	数据资料处理与分析
6.1	资料处理
6.2	分析解释
7	成果报告
7.1	一般规定
7.2	基本内容
	本规程用词说明
	附录 A 管波探测法原理
	附录 B. 0.1 管波探测钻孔资料记录表
	附录 B. 0.2 管波探测法记录及现场解释初步成果报表
	附录 C. 0.1 管波探测解释成果图
	附条文说明

钻孔管波探测技术规范

1 总则

- 1.0.1 为规范和统一管波探测技术方法，保证探测工作和探测成果质量，发挥管波探测技术在建设工程中的作用，提高经济效益，制定本规程。
- 1.0.2 管波探测法可用于探测钻孔一定范围内的溶洞、破碎带、溶蚀裂隙、软弱夹层等不良地质体分布情况，也可用于检测管桩桩身完整性、灌注桩桩身完整性及持力层岩体完整性、岩土性状等。
- 1.0.3 在现场作业时，应遵守现行安全和劳动保护的有关规定，做到安全作业。
- 1.0.4 管波探测，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家、行业及广西壮族自治区现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 管波 Tube wave

指在液体填充的孔内及孔壁上，沿钻孔轴向传播的广义瑞利波。

2.1.2 管波探测法 Tube wave detection

通过钻孔激发并接收管波，探测孔旁一定范围内不良地质体、基桩完整性缺陷的地球物理方法。

2.1.3 钻孔 borehole

用于管波探测的测试孔。

2.1.4 现场试验 field experiment

为确定采集参数和方法的有效性，正式采集工作前进行的测试。

2.1.5 测点 measuring point

管波探测在某一深度的测试点。

2.1.6 波阻抗 wave impedance

介质密度与波速的乘积。

2.1.7 直达波 Direct wave

在均匀地层中由震源直接传播到接收点的管波。

2.1.8 管波时间剖面图 Tube wave map

指按深度-时间排列的管波实测曲线图。

2.1.9 管波速度 Tube wave speed

指管波在介质中传播的速度

2.1.10 反射波 Reflected wave

指波动在不同密度的介质分界面发生反射的波。

2.1.11 下行波 Downgoing wave

指管波遇到界面向下反射的波。

2.1.12 上行波 Upgoing wave

指管波遇到界面向上反射的波。

2.1.13 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。

2.2 符号

A_i ——某一时间段内第 i 个采样点的管波幅值 (mV)；

N ——表示某一时间段内有 N 个采样点；

H ——深度(m);
 T —— H 深度时管波上下行或行反射波同向轴上的时间(s);
 ρ ——钻孔周围固体介质(岩土层)的密度(g/cm^3);
 ρ_f ——钻孔中流体(井液)的密度(g/cm^3);
 Q ——能量指标(mV);
 V ——管波视速度(m/s);
 V_f ——钻孔中流体(井液)的纵波波速(m/s);
 V_s ——钻孔周围固体介质(岩土层)的横波波速(m/s);
 V_d ——管波直达波视速度(m/s);
 l_o ——收发换能器的距离(m);
 t_d ——直达波走时(s)。

3 基本规定

3.0.1 管波探测法应在单个钻孔中进行,其应用条件应符合下列规定:

- 1 钻孔内应有充满液体,且液体比重不应大于 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。
- 2 探测目标体应与钻孔内液体有联系;
- 3 钻孔口径不得小于 76mm,且钻孔井壁应光滑,不塌孔,不掉块;
- 4 钻孔的垂直度应符合相关规范要求。揭露的基岩段达到规范或设计要求时,应加深 0.6m~

1.0m;

- 5 钻孔内管波探测段不宜有金属套管,必要时可放置塑料套管;
- 6 钻孔孔底沉渣应清捞干净,保证探头能到达孔底。

3.0.2 管波探测前,应收集相关资料。其主要内容应包括:

- 1 场地岩土工程勘察资料;
- 2 勘察任务委托书或勘察要求说明文件,基桩设计平面图及施工情况等;
- 3 场地建(构)筑物的平面图等资料;
- 4 场地及其邻近的干扰震源调查资料。

3.0.3 管波探测前,应编制管波探测方案。其主要内容应包括:

- 1 工程概况;
- 2 探测目的及要求,工作量;
- 3 对钻探方的相关要求;
- 4 拟投入的仪器设备及人员配备;
- 5 工作进度计划及提交成果内容和时间;
- 6 安全、质量、环保保证制度。

3.0.4 钻孔管波技术用于基桩检测时,除符合本规范外,还应符合《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106)。

3.0.5 工作程序

管波探测工作程序,应按图 3.0.5 的程序进行。

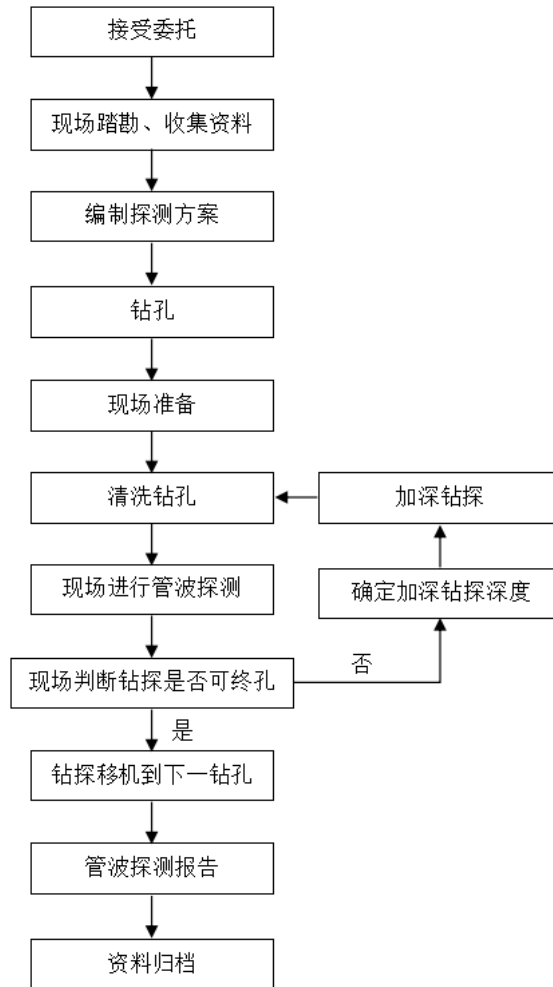


图 3.0.5 管波探测工作程序框图

3.0.6 管波探测应确保原始记录齐全完整、数据真实，不得事后追记，电子记录应做好备份。

3.0.7 管波探测仪器设备及其附件应满足性能稳定、构件牢固可靠、防潮、抗震和绝缘性能良好的要求。探测仪器应在检验校正的有效期内，并应定期保养，探测前应对仪器设备进行检查调试。

3.0.8 管波探测仪器应正确操作和使用，并应由具备相应专业能力的人员进行维护。

3.0.9 现场探测过程中，应避开对管波探测有影响的干扰震源。

3.0.10 管波探测任务完成后，应及时归档资料。包括现场探测方案、探测报告、原始记录、收集的相关资料等内容。

3.0.11 探测单位和人员

1 从事管波探测的单位和人员，其资质条件和技术能力应符合国家、行业、地方管理行政部门规定的要求。

2 开展管波探测工作的单位应建立质量保证体系，实行全过程质量控制。

3 现场管波探测技术人员应经过培训合格。

4 现场探测工作应配备足够数量的工作人员，可根据现场情况配备一定数量的辅助人员。

3.0.12 管波探测作业安全应遵守现行安全和劳动保护的有关规定，并符合现行国家标准《岩土工程勘察安全规范》GB50585 的相关规定。

4 仪器设备和处理软件

4.1 仪器设备

管波探测法使用的仪器设备应包括主机和孔内设备。

4.1.1 仪器设备主机应符合下列规定：

- 1 应具备波形实时显示、记录和存储功能；且应具有手动采集模式和连续采集模式；
- 2 最小采样时间间隔应不大于 0.02ms，系统频带宽度应在 100Hz～3000Hz，A/D 转换器不应小于 16bit；
- 3 信号幅值量程应不小于 ± 5 V，幅值测量相对误差应小于 10%；
- 4 应能自动记录测点深度位置，测量相对误差不应大于 0.5%。

4.1.2 孔内设备包括发射换能器、接收换能器和井下电缆，应符合下列规定：

- 1 发射换能器与接收换能器之间距离应固定，其有效中心之间间距宜为 0.6m。记录点应为发射换能器与接收换能器有效中心连线的中点；
- 2 发射换能器与接收换能器的最大外直径应小于 45mm。连接换能器的井下电缆应有深度标志，间隔应为 0.1m，深度误差不应大于 0.5%；
- 3 发射换能器应采用低频孔中换能器，单次发射能量应不小于 10J，发射的管波峰值频率应处于 500Hz～1000Hz 之间；
- 4 接收换能器应采用灵敏度不小于 3000 μ V/Pa 的水听器；
- 5 发射换能器、接收换能器、井下电缆水密性应满足在 1MPa 水压条件下不渗水。

4.2 处理软件

4.2.1 处理软件应符合下列规定：

- 1 具备查看和修改采集参数、数据图像显示和图像处理等基本功能；
- 2 具备识别和剔除坏道及干扰信号的功能；
- 3 具备深度修正、带通滤波、增益调整、时频分析等功能；
- 4 可绘制钻孔柱状图、管波时间剖面图或彩色伪剖面图、管波解释成果图等功能。

4.2.2 管波探测成果的各种文件应为通用格式。

5 现场采集

5.1 一般规定

- 5.1.1 管波探测工作前，应检查孔壁、孔深、沉渣及井液情况，确认探测探头能顺利放下。在井壁破碎情况下，应放入塑料套管，并准确记录套管安装情况；
- 5.1.2 管波探测工作前，应用小于孔径的吊锤反复清理孔壁，确认探头能顺利放至孔底；
- 5.1.3 管波探测正式采集前，宜进行现场试验，以确定合理的采集参数。同一钻孔的采集参数应保持一致；
- 5.1.4 测点间距的选择应满足任务要求的分辨率，保持固定。采用管波探测法进行工程勘察时，测点间距不宜大于 0.10m；采用管波探测法进行基桩检测时，测点间距不宜大于 0.05m；
- 5.1.5 管波探测的采样间隔不应大于 20 μ s，记录长度不应小于 25ms；
- 5.1.6 应以收发换能器连续中点作为记录点，以孔口作为零深度点，宜自下而上逐点进行测试。

5.2 正式采集

- 5.2.1 在正式采集前，应检查管波探测系统的参数设置、探头放置的初始位置。
- 5.2.2 仪器应设置在全通状态，仪器各道增益应一致；
- 5.2.3 宜匀速提升或下降探头，按点距、采用间隔采集数据。

5.2.4 采集工作结束后,应及时做好数据存贮和现场采集班报表记录。并从仪器外传数据做好备份,以防数据丢失。采集数据的存贮文件宜满足下列要求:

- 1 文件名应标识清晰,对于同一钻孔不同时间采集的记录文件应有不同标识。
- 2 现场采集班报表见附录 B。

5.3 采集记录质量评价

5.3.1 采集记录中的,有以下情况之一的,视为不合格记录。

- 1 直达波及孔底孔口反射波的同相轴不易识别的记录;
- 2 采集记录中连续漏掉两道及以上数据或漏掉道数大于总道数的 5%的;
- 3 采集记录中非边道的相邻两道为坏道或坏道数大于总道数 10%的;
- 4 干扰波严重影响有效波的识别的。

5.3.2 现场发现不合格记录,应及时进行重测。

6 数据资料处理与分析

6.1 资料处理

6.1.1 数据处理前,应对钻孔的套管深度、钻孔的坐标和高程进及深度行核对,对管波探测数据记录原始资料进行检查,对合格记录中的坏道应予以处理。

6.1.2 数据处理应符合下列规定:

- 1 数据处理时不得进行道间振幅平衡,可去除信号的直流零漂;
- 2 频率滤波时其通带宜为 300Hz~2000Hz;
- 3 各测点的测试曲线应采用相同的显示增益,可采用伪彩色剖面形式;
- 4 同一钻孔的多次测试时间剖面应绘制在同一成果图件中;

6.1.3 可根据现场采集数据按下式 (6.1.3) 计算接收信号的能量,绘制能量—深度曲线。

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i)^2 \quad (6.1.3)$$

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;

A_i —某一时间段内第 i 个采样点的幅值 (mV);

N —表示某一时间段内有 N 个采样点。

6.1.4 可根据能量—深度曲线绘制 PSD 曲线。PSD 值为曲线上相邻两点的斜率与能量差的乘积,其计算公式如下式 (6.1.3):

$$PSD_i = \frac{(Q_i - Q_{i-1})^2}{(H_i - H_{i-1})} \quad (6.1.4)$$

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)。

6.1.5 管波直达波视速度可根据现场采集的时深数据按下式 (6.1.5) 计算:

$$v_d = \frac{l_0}{t_d} \quad (6.1.5)$$

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)。

6.1.6 根据管波上行或下行反射波同向轴计算管波平均视速度。在波阻抗差异界面处出现上行或下行反射波，其同向轴的斜率代表管波在该层介质中传播的视速度。其计算公式如下：

$$v = 2 \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} \quad (6.1.6)$$

其中：H1—第一点深度 (m)，H2：第二点深度 (m)；

T1—深度 H1 时管波上行或下行反射波同向轴上的时间 (s)；

T2—深度 H2 时管波上行或下行反射波同向轴上的时间 (s)；

v —管波视速度 (m/s)。

6.1.7 应根据管波 PSD 曲线、能量曲线、管波时深剖面曲线特征、管波视速度进行综合分析，划分钻孔地层界面。

6.1.8 根据综合划分的界面，计算各界面的标高、深度、厚度。

6.2 分析解释

6.2.1 应根据管波 PSD 曲线、能量曲线、时深曲线、速度等综合划分的界面，确定分层界面之间岩土层的类别及工程性质。

6.2.2 采用管波探测法进行工程勘察时，应及时按表 6.2.1 判断完整基岩段的厚度，并按附录 B.0.2 提交初步结果。如厚度满足设计或规程规范要求，应终孔，如不满足要求时，应按框图 3.0.4 继续钻孔。

6.2.3 采用管波探测法进行工程勘察时，根据解释成果，确定桩基莫基建议高程、埋深。

6.2.4 制作管波探测成果图。内容包括钻孔柱状图、管波时深曲线剖面图、管波解释成果图。

6.2.5 统计各钻孔的分层情况。

7 成果报告

7.1 一般规定

7.1.1 编制管波探测报告依据的原始资料应客观真实、符合本规程的相关规定。

7.1.2 管波探测报告应内容全面，叙述准确、用词规程、重点突出，图表清晰；结论明确、建议合理。

7.1.3 完成某个工程的阶段性管波探测后，可视需要编写中间成果或阶段性成果报告，其结构可比正式成果报告简化。

7.2 基本内容

7.2.1 管波探测报告应根据任务要求、工程特点和工程地质条件等具体情况编写，应包括下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 任务目的和要求；
- 3 工程地质条件和地球物理特征；
- 4 工作方法与技术；
- 5 数据分析与解释；
- 6 结论与建议。

7.2.2 成果报告应附下列图表：

- 1 综合平面图、钻孔柱状图、管波时深曲线剖面图、管波解释成果图；
- 2 管波探测成果统计表。

7.2.3 勘察报告的文字、术语、代号、符号、数字、计量单位等均应符合国家现行有关标准的规定。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词，说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：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用词：正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：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”。

2 条文中指定应按其它有关标准、规程执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”，非必须按所指定的标准、规程执行时，写法为：“可参照……”。

附录 A
管波探测法原理

1、管波探测法的工作装置

根据波动传播空间的不同，将弹性波分为体波和面波两类。体波包括横波、纵波等，在无限或半空间中传播。面波包括瑞利波、斯通莱波、勒夫波等，仅在波阻抗差异界面附近传播。当相互接触的两种介质一种是流体另一种是固体时，流体的振动会在两种介质的分界面附近产生沿界面传播的面波，此面波称之为广义瑞利波。在充满液体的孔内及孔壁上，沿钻孔轴向传播的广义瑞利波，称作管波。常见的管波有两种类型：斯通莱波和准瑞利波（或称伪瑞利波）。斯通莱波（也被译为是斯通利波）由 Stoneley 在 1924 年首次发现。管波探测法使用的管波实际为斯通莱波。管波频率范围在 100Hz~5000Hz 内，现有设备接收到的直达、反射管波的中心频率约为 700Hz。

管波探测技术采用一发一收、收发距固定的单孔探测装置。如图 A.1 所示，把发射换能器和接收换能器以固定距离置于同一个钻孔中，发射换能器 S 发射一定频率的脉冲信号，在孔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发生反射，传播至接收换能器 R 时被接收，最终由管波探测仪主机存储并显示。将发射换能器 S 和接收换能器 R 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、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。

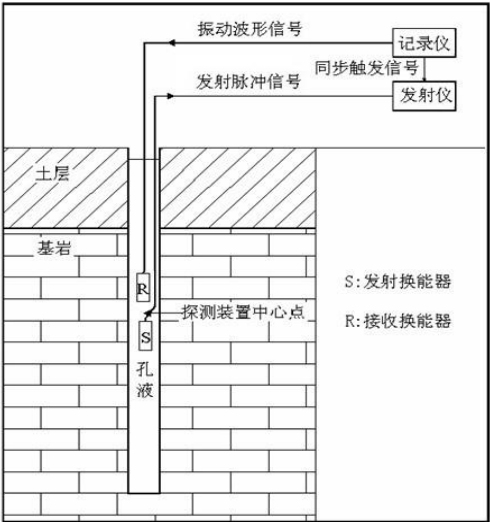
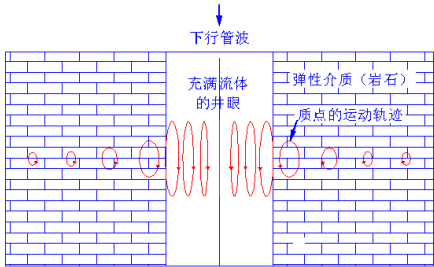


图 1 管波探测法的探测装置

2、管波传播特性

(1) 管波的质点运动规律与能量分布。斯通莱波沿钻孔的轴向传播，具有前推式质点运动轨迹，质点运动轨迹为椭圆。见图 2。图中 R-钻孔半径；其径向位移是连续的，在井壁处最大，在井壁外呈指数衰减。其轴向位移不连续，孔液中最大，在井壁外呈指数衰减。根据研究，管波能量集中在以钻孔中心为中心，半径为 1.5 个波长的范围内。且绝大部分能量集中在半波长内。



(2) 管波传播过程的能量衰减和频率变化。管波在沿钻孔轴向传播过程中，能量衰减慢、频率变化小。经历一定距离的传播，管波能量依然很强。经历一定距离的传播，管波的频谱与管波源的频谱基本一致。

(3) 管波的波速。前人对管波做过大量的研究与试验，Biot (1952) 和 Write (1956) 曾给出零频率时管波的波速 V_t 为：

$$V_t = \frac{V_f}{\sqrt{1 + \frac{\rho_f V_f^2}{\rho V_s^2}}} \quad (1-1)$$

式中： V_f ——钻孔中流体（井液）的纵波波速（m/s）；

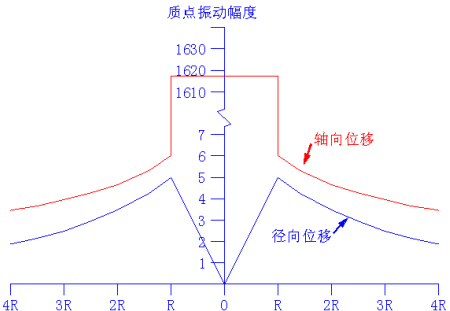


图 2 管波传播过程中质点的运动轨迹及振动幅度

ρ_f —— 钻孔中流体（井液）的密度（ g/cm^3 ）；

V_s —— 钻孔周围固体介质（岩土层）的横波波速（ m/s ）；

ρ —— 钻孔周围固体介质（岩土层）的密度（ g/cm^3 ）。

管波探测法设备激发的管波，其中心频率在 700Hz 左右，实测的管波波速与式 1-1 计算结果一致。如，钻孔内孔液为清水、周围固体介质为微风化石灰岩时，测得的管波波速约为 1350m/s~1420m/s 之间，约为清水纵波波速 1480m/s 的 0.90~0.95 倍；如钻孔内孔液为清水、周围固体介质为粘土层时，测得的管波波速约为 250m/s，与粘土层的横波波速相当。

（4）波能量与孔壁介质。管波探测法实测资料证明，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，横波波速高则管波的能量强，横波波速低则管波的能量弱。当激发或接收探头处于溶洞附近时，直达管波能量几乎为零。当激发或接收探头处于软弱岩层、土层中时，直达管波的能量、波速显著降低。管波的能量由直达管波和反射管波的波幅确定。

（5）管波的反射。与其他的弹性波一样，在波阻抗差异界面处，管波也会产生反射。考虑管波的传播空间，波阻抗差异界面包括：孔径变化处、液面处、孔底、孔壁波阻抗差异界面。管波探测法正是利用其中的孔壁波阻抗差异界面的反射，来进行探测。也就是说，在存在管波反射的位置，必定存在波阻抗差异界面。

①在灰岩地区钻孔中，波阻抗差异界面即为孔中、孔旁溶洞边界或软弱岩层顶底界面；

②对于预应力管桩，连接不良的接头、桩身破损处顶底界面均为波阻抗差异界面；

③对于灌注桩，断桩、空洞、夹泥、离析、蜂窝、裂隙等桩身缺陷，桩底沉渣的顶底界面均为波阻抗差异界面。持力层中软弱岩层的顶底界面亦为波阻抗差异界面；

④对于钻孔周围的地层，软弱夹层的顶底界面、风化程度差异界面均为波阻抗差异界面；

⑤在钻孔周围的地层中，如完整基岩中出现节理、裂隙发育，其顶底界面为波阻抗差异界面。

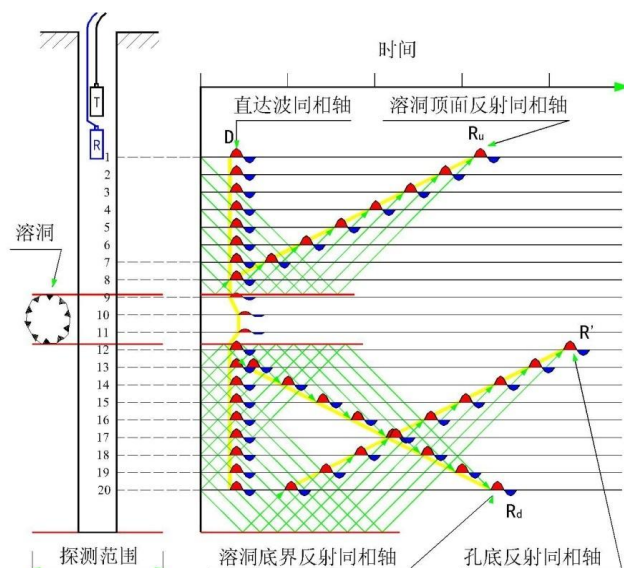


图3 管波探测法观测到的波组示意图

在管波传播范围内的波阻抗差异界面处，管波产生反射。采用收发换能器距离恒定、测点间距恒定的自激自收观测系统进行测试，垂直时间剖面中所有的反射管波以倾斜波组形式呈现，倾斜波组斜率的倒数的 1/2 等于管波的波速，具体可见图 3。

管波探测法应用于岩溶地区嵌岩桩桩位岩溶探测，一般在桩位超前钻探或详细勘察阶段与钻探工作同期进行。它利用桩位中心的一个钻孔，通过在孔液中激发管波，接收并记录其经过孔液和孔旁岩土体传播的振动波形，来探测孔旁一定范围内的岩溶、软弱岩层及裂隙发育带的发育和分布情况，可快速查明桩位旁一定范围内的地质情况、评价基桩持力层的完整性，指导基桩设计和施工，实测时间剖面与地质解释实例见图 4。其有效探测直径大于 2m，可分辨大于 0.3m 的孔旁岩溶、软弱岩层及裂隙发育带，定位误差小于 0.3m。管波探测法具有可靠性高、异常明显、分辨能力强、精度高、工期短、易于解释、仪器设备投资少、探测费用低等优点。

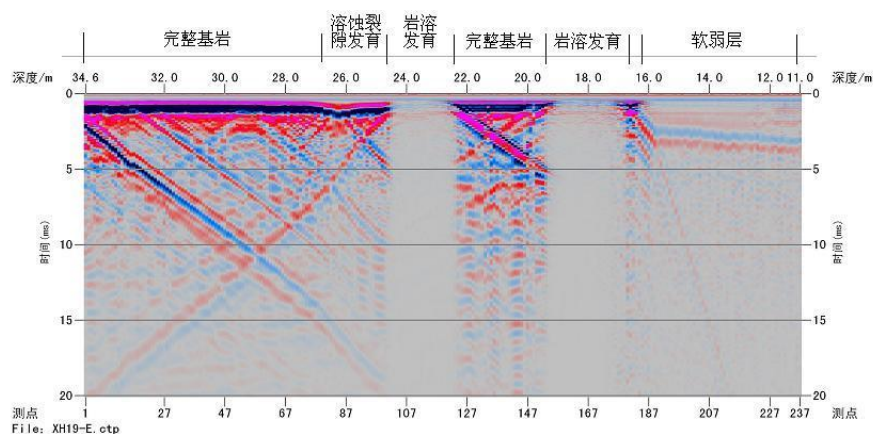


图4 管波探测法实测时间剖面与地质解释实例

(6) 管波探测法的探测范围、分辨能力及探测精度。管波探测法用于桩位岩溶勘察时，有效探测直径大于 2m，可分辨大于 0.3m 的孔旁溶洞，对溶洞的定位误差小于 0.3m；用于预应力管桩检测时，在管桩的中心孔中进行探测，可准确、快速、彻底检测整桩的桩身完整性，测点间距一般为 0.05m，可分辨大于 0.05 米的桩身缺陷；用于灌注桩检测时，只需利用一个钻芯孔，即可准确、快速、彻底检测整桩的桩身完整性、持力层完整性、基桩与持力层结合情况。有效检测桩径 2m，测点间距一般为 0.05m，可分辨大于 0.05m 的桩身缺陷、桩底沉渣、持力层缺陷。

经过国内十余家勘察设计单位，在高速公路、高速铁路、高层建筑、城市轨道交通等领域数百项工程，超过五万例桩位岩溶勘察的实施验证，管波探测法已是一种同行业专家、学者公认的理论成熟、依据充分、勘探效果显著的孔中物探方法。近几年，国内十余家勘察、设计、施工、检测单位，将管波探测法应用于桩基（含地下连续墙）质量检测、水文孔含水层位置确定、钻孔分层资料核准等，应用超万例，并取得丰富的经验和成果。

近几年来，管波探测法也应用于灌注桩检测等。一般在灌注桩钻芯法检测孔和灌注桩预埋塑料检测管中进行，探测桩身混凝土中空洞、夹泥、离析、裂隙等缺陷的位置与程度，评价桩身混凝土浇注质量、桩底沉渣厚度、桩身与持力层结合情况。

附录 B.0.1 管波探测钻孔资料记录表

工程名称													
钻探单位													
孔 号				孔口高程（m）					套管深度（m）				
孔深（m）				稳定水位（m）					岩面深度（m）				
钻孔坐标	X= ； Y=					钻进时间							
岩土 分层 情况	序 号	深度（m）		岩土描述		序 号	深度（m）		岩土描述				
		自	至				自	至					
	1				11								
	2				12								
	3				13								
	4				14								
	5				15								
	6				16								
	7				17								
	8				18								
	9				19								
	10				20								
	备注：												
钻孔 变径 情况	序 号	孔径 （mm）	深度（m）			序 号	孔径 （mm）	深度（m）					
			自	至				自	至				
	1				6								
	2				7								
	3				8								
	4				9								
	5				10								
	备注：					备注：							

填报人:

填報日期:

现场记录

附录 B.0.2 管波探测法记录及现场解释初步成果报表

工程名称											
孔号			孔口高程（m）			套管深度（m）					
孔深（m）			稳定水位（m）			岩面深度（m）					
参数设置		采样间隔： us； 采样长度： ms； 点距： cm									
测试方向		从孔底向孔口，□， 从孔口向孔底，□。 深度： m～ m。									
测试时间		年 月 日 时～ 时				记录文件名					
仪器操作						现场记录					
测试过程情况说明											
现场探测结果初步分析											
序号	深度（m）		分析结果		序号	深度（m）		分析结果			
	自	至				自	至				
1					11						
2					12						
3					13						
4					14						
5					15						
6					16						
7					17						
8					18						
9					19						
10					20						
备注：											
资料分析人员：					技术负责人：						
签名： 年 月 日					签名： 年 月 日						

管波探测解释成果图

附录 C.0.1 管波探测解释成果图

[illegible]

管波探测技术规程

条文说明

目 次

- 1 总则
- 2 术语与符号
 - 2.1 术语
 - 2.2 符号
- 3 基本规定
 - 4 仪器设备和处理软件
 - 4.1 仪器设备
 - 4.2 处理软件
- 5 现场采集
 - 5.1 一般规定
 - 5.2 正式采集
 - 5.3 采集记录质量评价
- 6 数据资料处理与分析
 - 6.1 资料处理
 - 6.2 分析解释
- 7 成果报告
 - 7.1 一般规定
 - 7.2 基本内容

1 总则

1.0.1 本条阐明了制定本规程的目的。随着技术的进步与不断发展，管波探测技术解决问题的能力不断提高，在国民经济建设中发挥作用越来越明显，并且成为工程勘察、基桩检测领域的重要技术手段。为了规范管波探测技术方法的工作技术要求，推进管波探测技术的合理使用，保证探测成果质量，提高经济效益，制定本规程。

1.0.2 管波探测法是在钻孔中利用“管波”这种特殊的弹性波，探测钻孔一定范围内地质体的孔中物探方法，在解决桩位岩溶探测方面，具有独特效果。

1.0.3 本条强调在作业过程中要以人为本，遵守岩土工程勘察等相关安全规程及国家现行的安全与劳动保护条例，做到安全生产。

1.0.4 本规程是管波探测技术应用的专业技术标准，与岩土工程勘察、质量检测等工作密切相关，因此在实际工作中会涉及到相关的技术标准等。所以，本条明确规定，管波探测除应符合本规程外，尚应符合国家、行业及广西壮族自治区现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

列出了本规程使用的主要术语。

2.2 符号

列出了本规程使用的主要符号。

3 基本规定

3.0.1 本条规定了应用管波探测法的钻孔条件。本条主要强调如下条件：

1 管波探测法需要井液耦合。井液浓度过大将导致管波能量下降、波速降低，影响探测效果。所以，在进行钻孔管波探测前，必须对钻孔进行清洗，使钻孔的液体比重不应大于 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2 在钻孔周边的空洞必须与钻孔内的液体有联系，否则无效。

3 管波探测探头口径一般为 50mm，如钻孔口径小于 76mm，或钻孔井壁不光滑，可能会影响管波探测探头在钻孔中的移动，钻孔塌孔、掉块，会卡探测探头。

4 为了保证钻孔的垂直度，应进行钻孔测斜。由于管波探测探头长度一般固定在 0.6m，为了保证探测效果，钻孔揭露的持力层基岩段厚度达到规范或设计要求时，应加深 0.6m~1.0m。

5 金属套管对管波等弹性波均存在屏蔽作用，故要求探测段无金属套管。

6 孔底沉渣较多，探头无法到达孔底，探测有效深度就无法保障。

3.0.2 本条规定了管波探测前，应收集资料的主要内容。

3.0.3 本条规定了管波探测前，应制定管波探测方案的主要内容。管波探测方案应在钻孔开工前交给勘察单位和业主单位。

3.0.4 本条规定了钻孔管波技术用于基桩检测时，桩位的钻孔孔数应符合：桩径 $D \leq 2\text{m}$ 的桩的孔数不得少于 1 个，桩径 $2\text{m} < D \leq 3\text{m}$ 的桩的孔数不得少于 2 个，桩径 $D > 3\text{m}$ 的桩的孔数不得少于 3 孔。此外，还应符合《建筑基桩检测技术规范》（JGJ 106），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 15MPa。

3.0.5 本条规定了管波探测工作程序。框图 3.0.5 是探测机构应遵循的管波探测工作程序。

3.0.6 本条规定了原始记录的填写、保护等要求。现场原始记录应做到数据准确、字迹清晰、信息完整，不得追记、涂改。如有笔误，应进行杠改，改动处应有改动人员的签名；电子记录应及时做好备份。

3.0.7 仪器设备是管波探测的工具，是获得可靠信息和提高工作效率的基本保证，是确保探测顺利进行的必备条件。因此，本条规定了性能稳定、构件牢靠的要求，适应工作环境的温度和湿度条件的仪器设备方能投入实际应用，这是对仪器设备的基本要求。并且对于探测仪器设备，做到定期检验校正，经常维护保养，使其保持良好性能状态。

3.0.8 对于仪器设备的操作和使用作了规定，并且要求维修和操作人员应该具备相应的能力。

3.0.9 干扰震源对管波探测成果有影响，探测时应避开。

3.0.10 本条规定了管波探测归档的主要内容。

3.0.11 本条对从事管波探测单位进行了规定，管波探测单位应取得岩土工程物探测试资质，其技术能力应符合相关规定的要求。

3.0.12 本条强调在作业过程中要以人为本，遵守有关安全规定，保证人身和仪器设备安全，并做到文明施工、保护环境和成果资料的安全保密，应符合现行国家标准《岩土工程勘察安全规范》GB50585 的相关规定。

4 仪器设备和处理软件

4.1 仪器设备

4.1.1 本条主要规定了用于管波探测法的仪器设备主机的要求。

1 规定了主机应具备实时显示和记录接收信号时程曲线及时间剖面的功能；且应具有手动采集模式和连续采集模式；

2 规定了主机应具备最小采样时间间隔、系统频带宽度、A/D 转换器的要求；

3 规定了主机的信号幅值量程、幅值测量相对误差的要求；

4 规定了主机应能自动记录测点深度位置及测量相对误差要求。

4.1.2 本条主要规定了用于管波探测法的孔内换能器的要求。

1 规定了在管波探测过程中，发射换能器与接收换能器的距离保持不变，宜为 0.6m。记录点为发射换能器与接收换能器有效中心连线的中点；

2 规定了发射换能器与接收换能器的最大外直径应小于 45mm，与之连接的井下电缆应有深度标志，间隔应为 0.1m，深度误差不应大于 0.5%；

3 规定了采用低频发射换能器，以激发低频管波；规定了发射换能器单次发射能量和发射管波的峰值频率，以保证有足够的能量穿透到孔旁岩土中；

4 规定了接收换能器应采用的水听器灵敏度要求；

5 规定了发射换能器、接收换能器、井下电缆水密性应满足 1MPa 水压条件下不渗水。

4.2 处理软件

4.2.1 本条主要规定了处理软件的基本要求。也是多年的实践中总结出来的经验的体现。各仪器厂商的软件有自己的特色，但是基本的功能都应该具备，以方便工程人员按规程要求出具勘察报告。

4.2.2 本条主要规定了管波探测成果各种的文件应为通用格式，便于报告编写中调用。

5 现场采集

5.1 一般规定

5.1.1 本条规定了在管波探测前，应对孔深进行核对，检查孔壁是否破碎，如孔壁破碎，应放入塑料套管；检查沉渣厚度是否过大，沉渣厚度宜小于 0.3m；检查井液比重是否不大于 1.2g/cm^3 ，用水进行清洗时，返水不浑浊即可，如不满足要求，需再清洗，至止满足要求。检查金属套管放置情况，对于厚度大于 3m 的中、强风化岩层放置有金属套管时，应其在桩基抗拔、桩侧摩阻力方面有利用价值，应拔除该段金属套管进行探测。

5.1.2 本条规定了用略小于孔径的吊锤反复清理孔壁。

5.1.3 本条规定了管波探测正式采集前，宜进行现场试验，以确定合理的采集参数，并规定同一钻孔的采集参数应保持一致；

5.1.4 本条规定了管波探测法的测点间距。工程勘察时测点间距不宜大于 0.10m；基桩检测时测点间距不宜大于 0.05m，测点间距的规定主要考虑分辨能力与空间采样率。

5.1.5 本条规定了管波探测的采样间隔和采样长度，采样间隔不应大于 $20\mu s$ ，记录长度不应小于 40ms。采样间隔的规定主要考虑分辨能力，记录长度的规定主要便于管波探测成果的分析 and 管波视速度的计算。

5.1.6 本条规定了管波探测记录点的位置。

5.2 正式采集

5.2.1 本条规定在管波探测正式采集前，应对探测系统的参数设置、探头放置的初始位置检查。

5.2.2 本条规定了仪器应设置在全通状态，要求仪器各道增益一致；

5.2.3 本条规定了提升或下降探头宜匀速，按点距、采用间隔采集数据。

5.2.4 本条规定了采集工作结束后，应及时做好数据存贮，存贮文件可以按工程名称或工程代号设置存贮文件的目录，按孔号设置各测试孔的数据的文件名。必要时，从仪器外传数据做好备份，以防数据丢失。根据现场采集情况，及时记录班报表。

5.3 采集记录质量评价

5.3.1 本条规定了不合格采集记录的基本连续。

5.3.2 本条规定了发现不合格记录，应及时进行重测。必要时，重新调整仪器采集参数。

6 数据资料处理与分析

6.1 资料处理

6.1.1 本条规定了对管波探测的相关原始记录进行核对和检查。检查采集记录的质量和现场采集参数的输入是否正确，对错误的输入应予以改正。对合格记录中的坏道应予以处理，处理完毕后进行存盘，存盘时另起文件名，不得覆盖原始记录文件。

6.1.2 本条规定了数据处理的基本要求。

1 管波探测法的重要异常特征之一是管波能量差异，不能进行道间振幅平衡处理，否则将导致异常特征灭失；

2 原始数据可进行滤波处理，滤波频带宜为 300Hz~2000Hz；

3 各测点测试曲线采用相同的显示增益，突出显示管波能量差异这一重要异常特征。采用伪彩色剖面显示可更加清晰、完整显示各种波组；

4 同一钻孔往往存在多次测试，其时间剖面应绘制在同一成果图片中。

6.1.3 本条规定了管波平均视速度的计算方法。它通过管波时深曲线图中的上行或下行反射波同向轴的斜率来计算的。各岩石的风化程度不同，其同向轴的斜率也不同，斜率越大，风化程度越低，管波速度越大。

6.1.4 本条规定了划分钻孔地层界面应根据管波 PSD 曲线、能量曲线、管波映像特征、管波视速度进行综合判断。

1 管波 PSD 曲线。在波阻抗差异的界面出现管波 PSD 曲线峰值，峰值处为分界面。管波 PSD 曲线峰值越大，界面上下的波阻抗差异越大。

2 能量曲线。管波的能量与钻孔周围介质的横波波速呈正相关关系。横波速度高，管波能量强，能量曲线幅度大，横波速低时，管波能量弱，能量曲线幅度小。风化程度越强，管波能量越弱，能量曲线幅度越小，风化程度越弱，管波能量越大，能量曲线幅度越大。

3 管波时深剖面曲线。不同岩土层的管波直达波、后续反射波组的特征是不同的，波阻抗小的岩土层管波直达波出现的时间比波阻抗大的岩土层的要迟后，且后续反射波组的频率较低，在分界面有同相轴拐点。在管波上行或下行波同向轴上出现拐点。

4 管波速度。在同一波阻抗段，其管波上行或下行波的同向轴是直线，其管波速度是相同的，不同波阻抗段对应的管波上行或下行波同向轴的斜率是不同的，管波速度也不同。管波上行或下行波同向轴的拐点就是波阻抗变化的交界面。波阻抗大，斜率就大，管波速度也大。

6.1.5 本条规定了划分的界面应标注标高、深度、厚度。通过钻孔口的标高计算各界面的标高、深度、厚度。

6.2 分析解释

6.2.1 对管波的分层进行地质解释，应根据层内管波的 PSD 曲线的峰值、能量曲线的幅度、映像特征、管波速度等划分的界面，确定分层界面之间岩土层的类别及工程性质。桩位岩溶勘察应用中，孔旁岩土类别划分见表 6.2.1-1 和表 6.2.1-2。灌注桩检测的桩身混凝土分类见表 6.2.1-3，桩底持力层划分参见表 6.2.1-1 和表 6.2.1-2。

不同风化层管波探测法孔旁岩土分类的地球物理特征表 表 6.2.1-1

分类	管波特征
全风化层	1、波阻抗小，直达波、反射波组向下弯曲，管波上行反射波同相轴斜率小，管波速度低，能量消散严重，能量曲线幅值接近于 0。 2、作为夹层，直达波弯曲、反射能量强、频率低，且上、下界面有明显的呈外“八”字型的管波上行、下行反射波组，其同相轴斜率小，管波速度低；在上、下界面处 PSD 曲线均有很明显的波峰；能量消散严重，能量曲线幅值接近于 0。 3、上下层为波阻抗小的全风化层或土层时，直达波后出现倾斜的、上行、下行管波反射波组，“X”字型特征较明显。
强风化层	1、波阻抗较小，直达波、反射波组向下弯曲，管波上行反射波同相轴斜率较小，管波速度较低，能量消散明显，能量曲线幅值较低。 2、作为夹层，直达波有时弯曲、反射能量较强、频率较低，且上、下界面有较明显的呈外“八”字型的管波上行、下行反射波组，其同相轴斜率较小，管波速度较低；在上、下界面处 PSD 曲线均有较明显的波峰；能量消散明显，能量曲线幅值较低。 3、上下层为波阻抗小的强风化、全风化层或土层时，直达波后出现倾斜的、上行、下行管波反射波组，“X”字型特征较为明显。
中风化层	1、波阻抗较大，反射频率较高，管波上行反射波同相轴斜率较大，管波速度较大，能量消散不明显，能量曲线幅值较大。 2、作为夹层，反射频率较高，且上、下界面有较明显的呈外“八”字型的管波上行、下行反射波组，其同相轴斜率较大，管波速度较大；在上、下界面处 PSD 曲线均有较明显的波峰；能量消散不明显，能量曲线幅值较大。 3、上下层为波阻抗小的中风化、强风化、全风化层或土层时，直达波后出现倾斜的、下行上行管波反射波组，“X”字型特征较明显。
微风化层	1、波阻抗大，管波上行反射波同相轴斜率大，管波速度高，无明显能量消散现象。能量曲线的幅值大。 2、上层或上下层波阻抗差异大时，直达波以后出现倾斜的、下行上行反射波组，有明显的“X”字型特征，且能量很强。能量曲线的幅值大。

岩溶区管波探测法孔旁岩土分类的地球物理特征表 表 6.2.1-2

分类	管波特征
土层	1、直达波速度低，波组到达时间长、能量微弱； 2、无反射管波同相轴穿过。
溶洞发育段	1、直达波能量很弱或不可见； 2、顶底界面反射波组能量强、频率低，在本段以外发育； 3、顶底界面以外的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量突然消散。
软弱岩层	1、直达波速度变低、波组向下弯曲，能量很弱或不可见； 2、顶底界面反射波组向外的一支能量强、频率低，向内的一支能量弱、频率低、速度低； 3、顶底界面以外的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量突然变低、频率低、速度变低。
溶蚀裂隙发育	1、直达波速度稍低、波组向下弯曲，能量变弱； 2、顶底界面反射波组能量低、频率较高、反射密集分布； 3、顶底界面以外的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，反射能量突然变低。
节理裂隙发育	1、直达波速度高、能量较强； 2、顶底界面反射波组在层内可见，能量强、速度高，并可能有多次反射。 3、段内存在多组呈“八”字形的层内反射，层内反射能量低、频率高。
完整基岩	1、直达波速度高、能量强； 2、顶底界面反射波组在层内能量强、速度高，并有多次反射。顶底界面反射无能量消散现象。 3、段内无反射界面。

管波探测法桩身混凝土分类的异常特征表 表 6.2.1-3

分类	管波特征
严重缺陷混凝土	1、直达波速度变低、波组向下弯曲，能量为完整混凝土的 25%以下； 2、顶底界面反射波组向外的一支能量强、频率低，向内的一支能量弱、频率低、速度低； 3、顶底界面以外的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量突然变低、频率低、速度变低。
一般缺陷混凝土	1、直达波速度稍低、波组向下弯曲，能量为完整混凝土的 25%至 50%； 2、顶底界面反射波组能量低、频率较高、反射密集分布； 3、顶底界面以外的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，反射能量突然变低。
轻微缺陷混凝土	1、直达波速度高、能量为完整混凝土的 75%以上； 2、顶底界面反射波组在层内可见，能量强、速度高，并可能有多次反射。 3、段内存在多组呈“八”字形的层内反射，层内反射能量低、频率高。
完整混凝土	1、直达波速度高、能量强； 2、顶底界面反射波组在层内能量强、速度高，并有多次反射。顶底界面反射无能量消散现象。 3、段内无反射界面。

桩身完整性类别判定 表 6.2.1-4

桩身完整性类别	特征
I 类桩	桩身完整，无缺陷段； 存在轻微缺陷，但纵向分布不连续。
II 类桩	存在轻微缺陷，纵向分布连续； 存在明显缺陷，但纵向分布不连续。
III类桩	存在明显缺陷，纵向分布连续； 存在严重缺陷，但纵向分布不连续
IV类桩	存在严重缺陷，纵向分布连续

6.2.2 本条规定了采用管波探测法进行工程勘察时，应根据现行国家标准有规定：端承桩桩端以下应有三倍桩径并不小于 5m 的完整基岩，判断持力层是否达到要求。

6.2.3 本条规定了管波探测法应用于桩位岩溶勘察时，可以提供桩基奠基高程、埋深设计建议值。

6.2.4 本条规定了对管波探测成果图的基本要求。

6.2.5 本条规定了对钻孔的岩土性状进行统计，尤其是不良地质现象。

7 成果报告

7.1 一般规定

本条文规定了成果报告的格式、基本内容、提交图表等。