

Application of Tube Wave Method in Karst Investigation and Pile Detection

Jiping Su, Wangming Li, Li He, Zhi Wang

Hunan Institute of Geological Engineering Exploration, Zhuzhou Hunan
Email: sjp6689@163.com

Received: Aug. 6th, 2020; accepted: Aug. 19th, 2020; published: Aug. 26th, 2020

Abstract

This paper introduces the basic principle of the tube wave detection method and the basic method of data collection, processing and interpretation. Through the engineering example, it is shown that the method of "one borehole + tube wave detection" can be used for the construction investigation and pile quality detection in the Karst development area where pile foundation is used as the building foundation, which can make up for the shortage of "one hole view" and avoid the rock socketed in half of the pile and the pile body. The misjudgment of quantity ensures the safety and stability of the building, and the tube wave detection method has a good application prospect in Karst investigation and foundation pile detection.

Keywords

Tube Wave, Construction Survey, Pile Detection, Karst Cave

管波探测法在岩溶勘察与基桩检测中的应用

苏吉平, 李望明, 何力, 汪智

湖南省地质工程勘察院, 湖南 株洲
Email: sjp6689@163.com

收稿日期: 2020年8月6日; 录用日期: 2020年8月19日; 发布日期: 2020年8月26日

摘要

本文介绍了管波探测法基本原理与数据采集、处理、解释的基本方法; 通过工程实例表明: 对于采用桩基础作为建筑基础的岩溶发育地区, 采用“一个钻孔 + 管波探测法”的方式进行施工勘察与基桩质量检测, 可弥补“一孔之见”的不足, 避免基桩半边嵌岩及桩身质量误判, 使建筑物安全和稳定性更有保

障；管波探测法在岩溶勘察与基桩检测中具有良好应用前景。

关键词

管波探测法，施工勘察，基桩检测，溶洞

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

采用桩基础作为建筑基础使用，越来越广泛。湖南省是一个岩溶地质灾害发育的省份，地下溶(土)洞、软弱夹层等不良地质体的存在对桩基础的稳定和安全构成了威胁。

在岩溶地区进行施工勘察时，对于大直径嵌岩桩，往往采用一桩一孔，甚至一桩多孔进行勘探，因“一孔之见”的局限性，均难以有效探明桩位范围内的岩溶(洞)发育情况，依然存在基桩半边嵌岩、持力层中存在溶洞的风险隐患(图 1)。

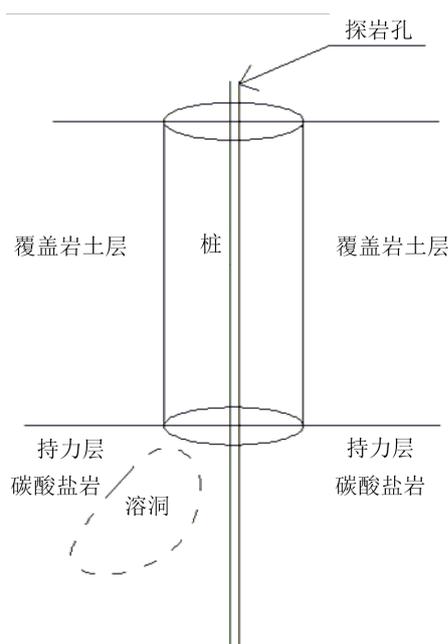


Figure 1. Schematic diagram of half-edge rock-embedding of foundation pile in construction investigation

图 1. 施工勘察中基桩半边嵌岩示意图

在基桩检测时，根据《建筑基桩检测技术规范》JGJ106-2014 钻芯法要求：“桩径为 1.2~1.6 m 的桩的钻孔数量宜为 2 个孔，桩径大于 1.6 m 的桩的钻孔数量宜为 3 个孔”。钻芯法工作劳动强度大、成本高、钻探取芯技术水平参差不齐，也存在一孔之见评价桩身全断面质量的局限性，影响对基桩质量的准确判断，同时又缺乏合适的复检方法，不利于工程质量的监管。

为了解决上述难题,笔者结合实际工程经验,在施工勘察或基桩检测钻探取芯后,再在孔中进行单孔物探测试——管波探测,综合判定桩位岩溶与桩身缺陷情况。管波探测法是一种新的单孔物探方法,在桩位中心的一个勘察钻孔进行管波探测,即可快速探明桩位范围内(半径约1 m)的岩溶、软弱夹层、裂隙带的发育和分布情况,评价嵌岩桩持力层的完整性与基桩钻芯法检测质量等级,为科学施工及质量检测提供技术保障[1]。“管波探测法”与“一桩多孔”的桩位勘察或基桩检测方式相比较,节省勘察成本,建设工期、建筑物安全和稳定性更有保障。

2. 方法原理与技术

1) 方法原理

根据弹性波理论,在弹性界面上形成的反射波和折射波,它们随着时间的增加向整个弹性空间的介质体积内传播,这类称为体波;相对体波而言,在弹性分界面还存在另一类波,其能量只分布在弹性分界面附近,这类称为界面波[2];管波为沿填充体液的钻孔孔轴传播的界面波。研究表明:管波的能量集中在界面以外半波长的范围内,即管波的探测范围为以钻孔中心为轴心,管波的半波长为半径的圆柱状区域,考虑到管波的径向能量衰减及分辨率的因素,探测半径约为1.0 m;钻孔旁侧的岩性差异及溶洞、软弱夹层等不良地质体形成波阻抗变化,在管波的有效探测范围内都将产生能量衰减与管波反射[3](图2)。

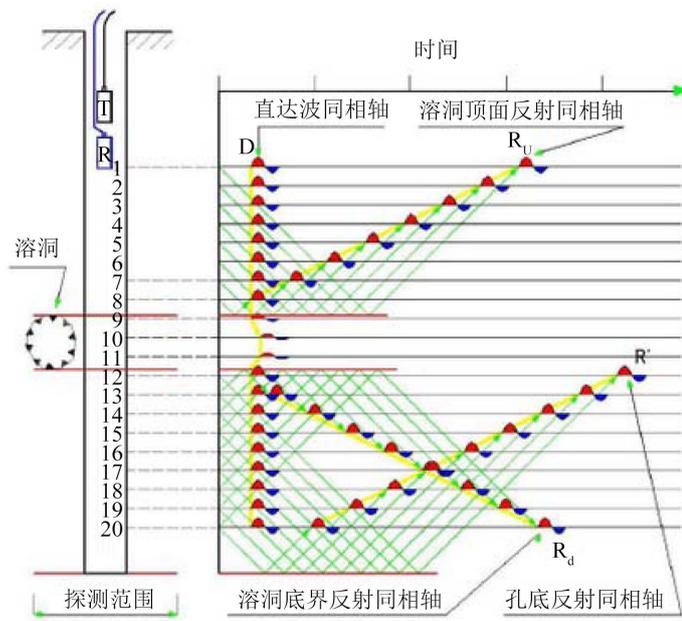


Figure 2. Schematic diagram of tube wave detection method
图2. 管波探测法探测原理示意图

2) 工作技术

数据采集:管波探测法的工作装置采用自激自收观测系统(图3),工作时由记录仪同步控制发射仪发射脉冲信号,经发射换能器T转换成振动脉冲后,孔壁周边将产生管波,管波沿钻孔轴向进行上下传播;直达管波先到达接收换能器R,反射管波及后续多次反射管波随后到达接收换能器R,并换成电信号被记录仪接收记录,接收探头和发射探头的中心点为记录点;自下而上进行点测,点距0.1 m,异常位置可加密。

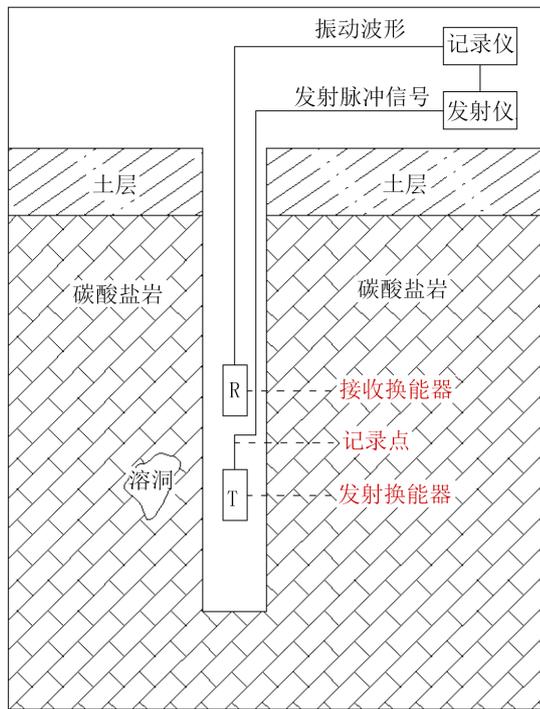


Figure 3. Schematic diagram of data acquisition by tube wave detection method

图 3. 管波探测法数据采集示意图

数据处理: 数据处理分为数据预处理与数据实质性处理两部分(图 4), 解译分管波时间剖面的定性解译和三参数曲线的定量解译[4]; 采用管波剖面图解译可满足一般施工勘察项目的工程应用需求。

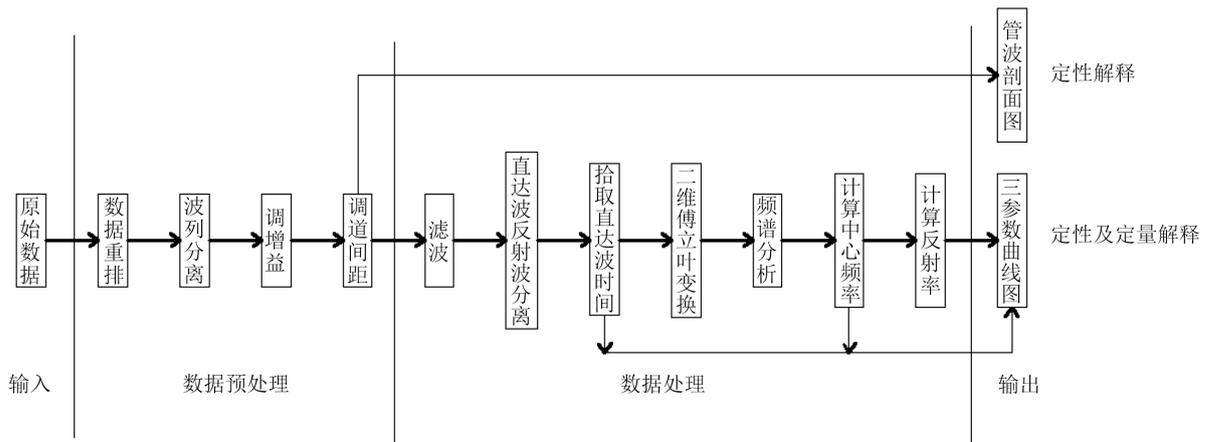


Figure 4. Schematic diagram of data processing flow of tube wave detection method

图 4. 管波探测法数据处理流程示意图

资料解译: 当管波在传播方向上遇到空洞、软弱夹层等缺陷时, 在缺陷附近存在波阻抗差异, 管波在波阻抗界面将产生透射和反射[5]。透射直达管波穿过缺陷内低速介质时, 走时增加, 时间延后; 当管波穿过缺陷后, 各种频率成分的管波能量将衰减, 高频部分比低频部分衰减严重, 因而导致管波的中心频率降低; 在波阻抗界面处将产生反射管波, 距离反射界面越近, 反射能量越强, 因此在波阻抗界面反

射系数最大。根据管波探测法时间剖面中首波声时变化，波组形态或波幅能量大小、有无顶底界面反射波等特征等可判定相应位置是否存在岩溶裂隙或软弱夹层等低密度地质体。

3. 工程应用

1) 施工勘察中的应用

① 醴陵市五彩台北城项目，位于醴陵市国瓷路与醴泉路交汇处，设计采用大口径嵌岩桩基础类型。根据场地前期勘察资料，场地地处岩溶地区，岩溶极其发育，工程地质条件异常复杂，少部分桩位基岩持力层起伏变化大，一期两栋楼房进行了桩底探岩，成桩后经钻芯法检测，仍发现了 15%的桩底有岩溶，只能进行后期处理，耽误了工期，耗费了大量的工程费用。

经前车之鉴，通过业主、勘察、监理等有关单位讨论，对该项目二期 11#、13#桩位采用钻探+管波探测法进行施工阶段勘察工作；11#、13#桩实施了 152 个探岩孔，且均进行了管波探测；成果表明：经管波探测发现有岩溶而未被钻探揭露的钻孔有 16 个，占比为 10.5%；成桩后经钻芯法检测，未发现桩底有岩溶；该方法大大提升了施工勘察对基桩施工的指导作用；典型实例如下：

11-1 钻孔柱状图(图 5)显示：在标高 25.22 m~21.49 m、20.52 m~19.91 m 为溶洞，其他段为较完整中风化灰岩；采用管波探测法进行探测对比，成果解释如下表 1：

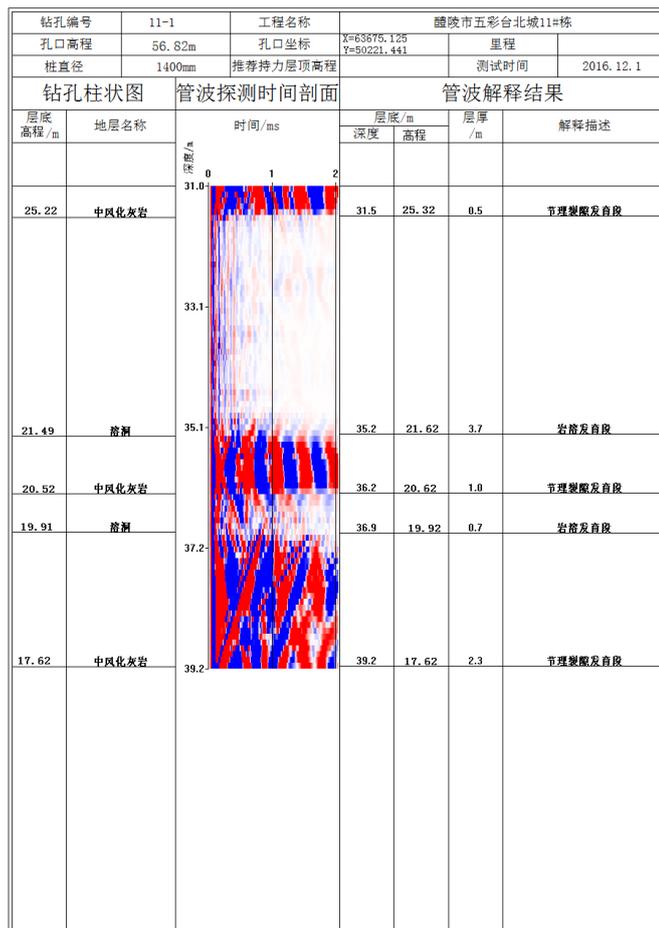


Figure 5. 11-1 Contrast chart of cylinder and tube wave detection and interpretation

图 5. 11-1 钻孔柱状与管波探测解译对比图

Table 1. 11-1 borehole tube wave detection results table
表 1. 11-1 钻孔管波探测成果表

序号	标高	管波信号特征	管波解释结果	工程判定与分类
1	25.32 m~21.62 m	首波极弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列不可见, 管波传播极不稳定。	岩溶发育	溶蚀裂隙极发育、溶洞; 不宜作为桩端持力层
2	21.62 m~20.62 m	首波清晰, 声时呈轻微蠕动变化、波幅能量稍弱、管波传播稳定。	节理裂隙发育	岩质较硬、较完整、节理裂隙相对发育; 宜作为桩端持力层
3	20.62 m~19.92 m	首波极弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列不可见, 管波传播极不稳定。	岩溶发育	溶蚀裂隙极发育、溶洞; 不宜作为桩端持力层
4	19.92 m~17.62 m	首波清晰, 声时呈轻微蠕动变化、波幅能量稍弱、管波传播稳定。	节理裂隙发育	岩质较硬、较完整、节理裂隙相对发育; 宜作为桩端持力层

因此, 管波探测成果图在标高 25.32 m~21.62 m、20.62 m~19.92 m 岩溶特征反映明显, 异常位置与钻孔柱状吻合。

11-23 钻孔柱状图(图 6)显示 37.43 m~31.93 m 为较完整中风化灰岩; 而采用管波探测法进行探测对比, 发现下段有岩溶发育, 具体成果解释如下表 2:

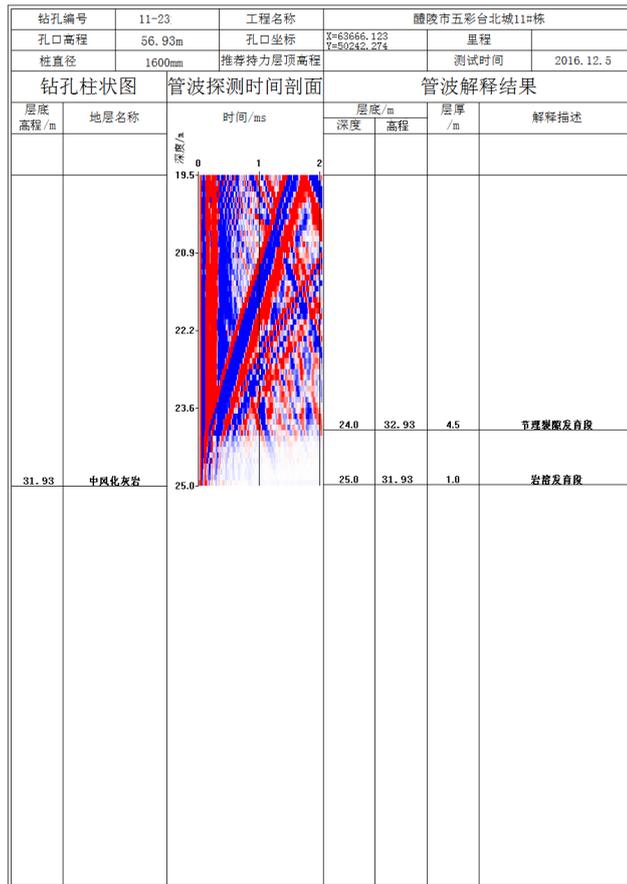


Figure 6. 11-23 Comparison of cylinder and tube wave detection and interpretation of Borehole

图 6. 11-23 钻孔柱状与管波探测解释对比图

Table 2. 11-23 Borehole tube wave detection results table
表 2. 11-23 钻孔管波探测成果表

序号	标高	管波信号特征	管波解释结果	工程判定与分类
1	37.43 m~32.93 m	首波清晰, 声时呈轻微蠕动变化、波幅能量稍弱、管波传播稳定。	节理裂隙发育	岩质较硬、较完整、节理裂隙相对发育; 宜作为桩端持力层
2	32.93 m~31.93 m	首波极弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列不可见, 管波传播极不稳定。	岩溶发育	溶蚀裂隙极发育、溶洞; 不宜作为桩端持力层

综上, 管波探测图在标高 32.93 m~31.93 m 位置岩溶特征反映明显, 表明上述位置的钻孔旁侧有溶洞发育, 不宜作为桩端持力层。

② 株洲市北环路(云龙大道 - 迎宾大道)新建工程, 位于株洲市云龙示范区云龙大道旁, 桥梁基础设计采用大口径嵌岩桩基础; 根据勘察资料, 场地地处岩溶地区, 岩溶极其发育, 工程地质条件异常复杂, 因此采用钻探+管波探测法进行施工阶段勘察工作; 典型实例如下:

ZK72 号钻孔柱状图(图 7)显示: 标高 8.23 m~6.73 m、3.23 m~1.83 m 为溶洞, 半充填; 其他段为较完整中风化灰岩; 采用管波探测法进行探测对比, 成果解释如下表 3:

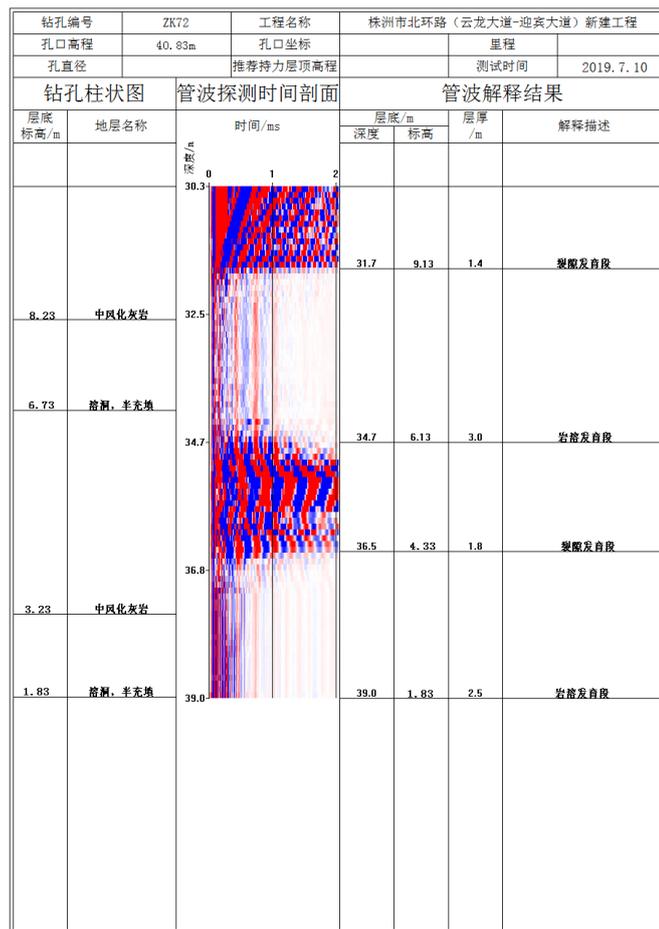


Figure 7. ZK72 Borehole column and tube wave detection interpretation comparison chart

图 7. ZK72 钻孔柱状与管波探测解译对比图

Table 3. ZK72 borehole tube wave detection results table
表 3. ZK72 钻孔管波探测成果表

序号	标高	管波信号特征	管波解释结果	工程判定与分类
1	10.53 m~9.13 m	首波清晰, 声时呈轻微蠕动变化、波幅能量稍弱、管波传播稳定。	节理裂隙发育	岩质较硬、较完整、节理裂隙相对发育; 宜作为桩端持力层
2	9.13 m~6.13 m	首波极弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列不可见, 管波传播极不稳定。	岩溶发育	溶蚀裂隙极发育、溶洞; 不宜作为桩端持力层
3	6.13 m~4.33 m	首波清晰, 声时呈轻微蠕动变化、波幅能量稍弱、管波传播稳定。	节理裂隙发育	岩质较硬、较完整、节理裂隙相对发育; 宜作为桩端持力层
4	4.33 m~1.83 m	首波极弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列不可见, 管波传播极不稳定。	岩溶发育	溶蚀裂隙极发育、溶洞; 不宜作为桩端持力层

综上: 管波探测图在标高 9.13 m~6.13 m、4.33 m~1.83 m 岩溶特征反映明显, 管波确定的岩溶洞高比钻孔柱状确定的要大, 表明钻孔旁侧也存在溶洞, 溶洞是斜向型。

ZK102 号钻孔柱状图(图 8)显示: 在标高 17.94 m~10.35 m 为较完整中风化灰岩, 而采用管波探测法进行探测对比, 发现有岩溶发育, 具体成果解释如下表 4:

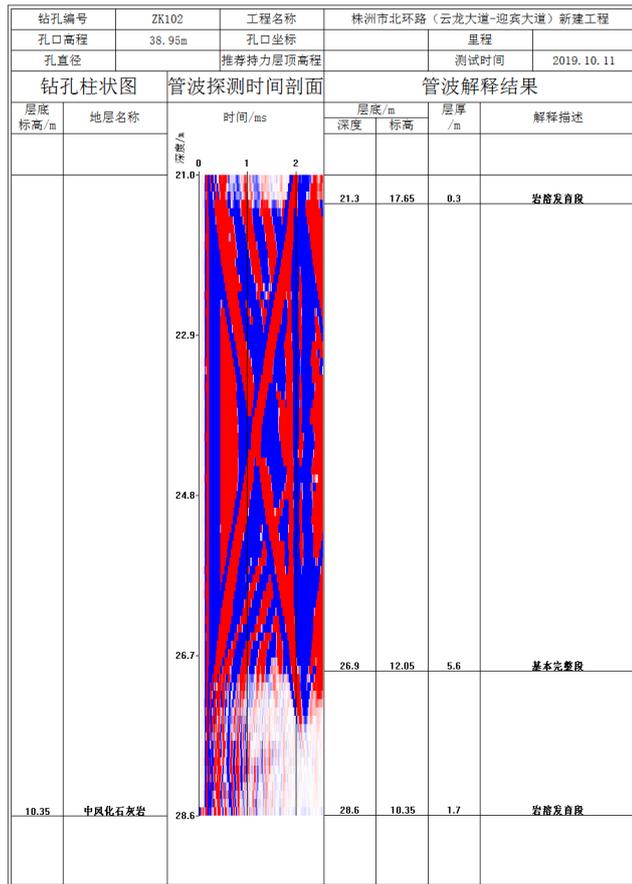


Figure 8. ZK102 Borehole column and tube wave detection interpretation comparison chart

图 8. ZK102 钻孔柱状与管波探测解译对比图

Table 4. ZK102 borehole tube wave detection results table
表 4. ZK102 钻孔管波探测成果表

序号	标高	管波信号特征	管波解释结果	工程判定与分类
1	17.95 m~17.65 m	首波清晰, 声时呈轻微蠕动变化、波幅能量稍弱、管波传播稳定。	节理裂隙发育	岩质较硬、较完整、节理裂隙相对发育; 宜作为桩端持力层
2	17.65 m~12.05 m	首波清晰, 声时变化小、波幅大、能量强、管波传播稳定。	基岩完整	岩质较硬、完整; 宜作为桩端持力层
3	12.05 m~10.35 m	首波极弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列不可见, 管波传播极不稳定。	岩溶发育	溶蚀裂隙极发育、溶洞; 不宜作为桩端持力层

综上: 管波探测图在 17.95 m~17.65 m、12.05 m~10.35 m 位置岩溶特征反映明显, 表明上述位置的钻孔旁侧有溶洞发育。

2) 基桩检测中的应用

① 某工程项目 18#桩, 桩长与桩径分别为 27.0 m、0.8 m, 灌注混凝土强度等级为 C30; 基桩钻芯法检测结果为 24.2 m~24.8 m、25.7 m~27.0 m 段混凝土芯样破碎, 后在钻芯孔内采用管波探测法进行检测, 检测结果如下表 5:

Table 5. 18 # pile pipe wave test results table
表 5. 18#桩管波检测成果表

序号	自桩顶深度	管波时间剖面图特征	工程解释	基桩完整性分类
1	19.0~24.0	首波清晰, 声时变化小、波幅大能量强、无反射波界面。	桩身完整	I
2	24.0~25.0	首波变弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量明显减弱、波列弯曲, 有反射波界面	桩身混凝土胶结差、松散或夹泥	III、IV
3	25.0~25.5	首波清晰, 声时变化小、波幅大能量强、无反射波界面。	桩身完整	I
4	25.5~27.0	首波变弱或消失, 声时明显延长或不可读、波幅能量明显减弱、波列弯曲, 有反射波界面	桩身混凝土胶结差、松散或夹泥	III、IV
5	27.0~28.2	首波清晰, 声时变化小、波幅大能量强、管波传播稳定。	基岩完整	岩质坚硬、完整; 宜作为桩端持力层

综上: 管波探测时间剖面图(图 9)在 24.0 m~25.0 m、25.5 m~27.0 m 位置反映为混凝土破碎或严重离析, 桩身完整性不满足规范要求, 与钻芯法检测相符。

② 某工程项目 45#灌注桩, 桩长与桩径分别为 4.10 m、0.8 m。钻芯法检测结果为桩身混凝土连续、完整, 桩底沉渣厚度为 5 cm; 后在钻芯孔内采用管波探测法进行对比检测, 检测结果如下表 6:

综上: 管波探测剖面(图 10)在 3.90 m~4.10 m 位置沉渣反映明显, 判定该桩桩底沉渣厚度为 20 cm (3.90 m~4.10 m), 不满足规范要求。

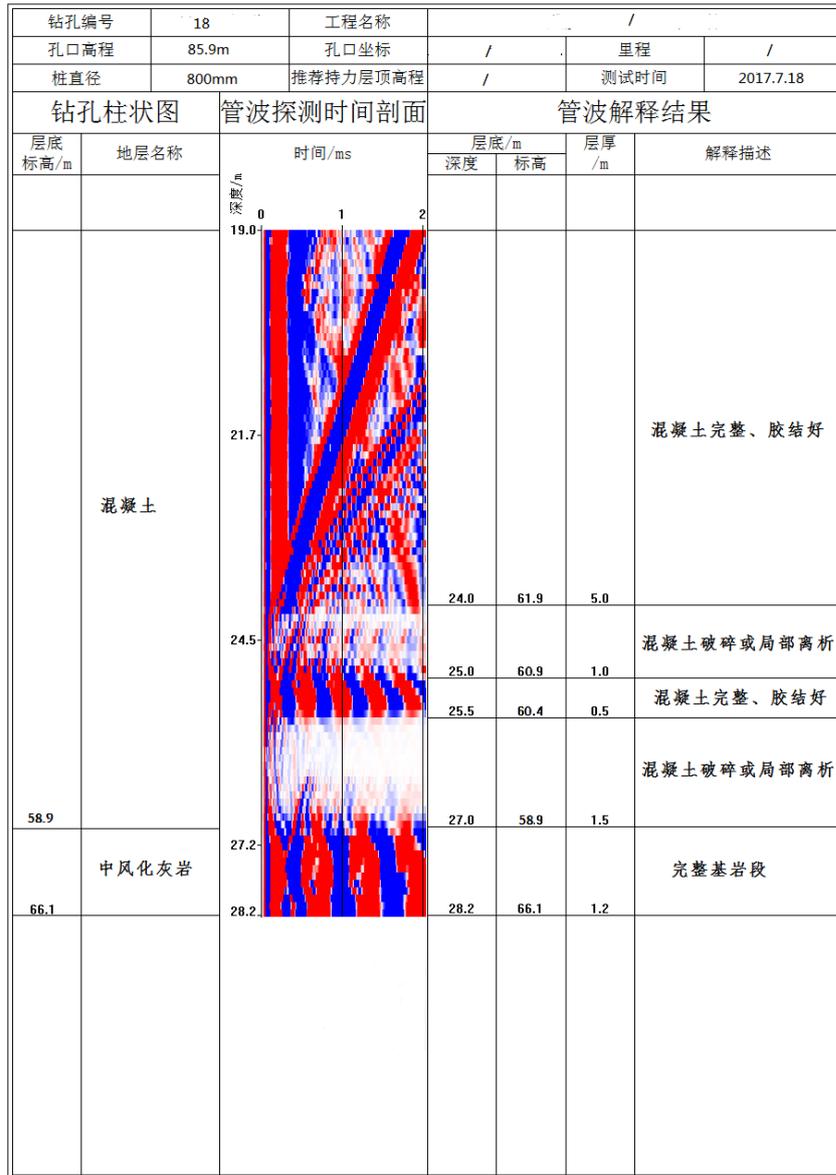


Figure 9. The results of tube wave detection and analysis
图 9. 管波探测分析成果图

Table 6. 45 # pile pipe wave test results table
表 6. 45#桩管波检测成果表

序号	自桩顶深度	管波时间剖面图特征	工程解释	基桩完整性分类
1	3.0~3.9	首波清晰，声时变化小、波幅大能量强、无反射波界面。	桩身完整	I
2	3.9~4.1	首波极弱或消失，声时明显延长或不可读、波幅能量极弱、波列明显弯曲或不可见，有明显反射波界面	桩底沉渣	不满足规范要求： 摩擦型桩 < 10 cm 端承型桩 < 5 cm
3	4.1~8.8	首波清晰，声时变化小、波幅大能量强、管波传播稳定。	基岩完整	岩质坚硬、完整；宜作为桩端持力层

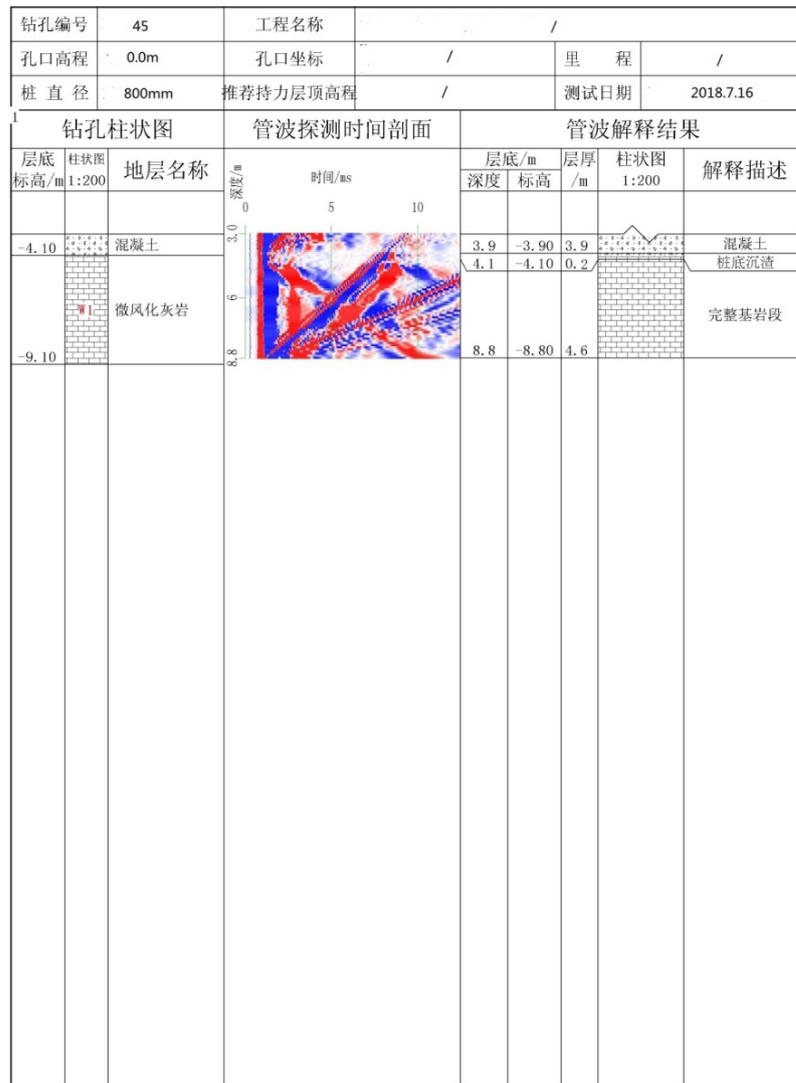


Figure 10. The results of Tube Wave Detection and analysis
图 10. 管波探测分析成果图

4. 结语

1) 工程实例表明,管波探测法在施工勘察与基桩检测中能取得很好的应用效果。在桩底岩溶探测中,管波探测法可以有效的查明桩底孔旁岩溶裂隙与软弱夹层的发育情况,完全杜绝了基桩半边嵌岩、持力层存在溶洞的隐患,为桩底完整性提供充分保障;在基桩检测中,管波探测法可以有效的检测桩身缺陷及桩底沉渣厚度,为基桩钻芯法检测及仲裁检验增加了一种科学的方法。

2) 采用“一个钻孔 + 管波探测法”的方式,对大直径桩可减少钻孔数,从而节省时间和钻孔费用。

3) 由于刚套管具有管波信号屏蔽作用,因此,在实际应用中,若遇易垮孔地层,一般在管波测试段上部采用钢套管护壁、管波测试段不应采用刚套管。另外需要指出的是在实际工程应用中管波探测法的参数异常有可能是地层界面、孔径改变等非缺陷波阻挡界面造成的,解释时需要结合钻孔资料。

4) 目前,管波探测法无法判定溶洞对于钻孔的具体方位,此时需结合其他方法(如孔中雷达法)进行综合判定。

致 谢

感谢审稿人和编辑部提供的有益建议。

参考文献

- [1] 李学文, 饶其荣. 管波及其工程应用[J]. 物探与化探, 2005, 29(5): 463-464.
- [2] 姚姚. 地震波场与地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [3] 吴庆曾. 基桩声测与动测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 李望明, 吴述来, 易强. 利用管波信息进行定量解释的方法[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 311-313.
- [5] 易强, 吴述来, 李望明, 等. 管波探测法在混凝土灌注桩桩身完整性检测中的应用效果[J]. 工程地球物理学报, 2015.