



江苏省地质工程勘察院
Geo-engineering Investigation Institute of Jiangsu Province

管波探测法在岩溶区桩基勘察中的应用

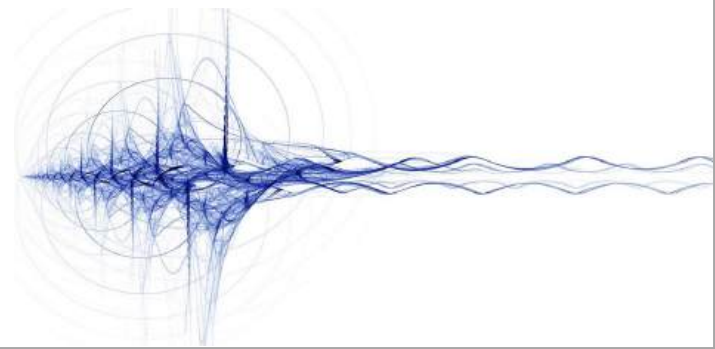
江苏省地质工程勘察院有限公司

2026年4月

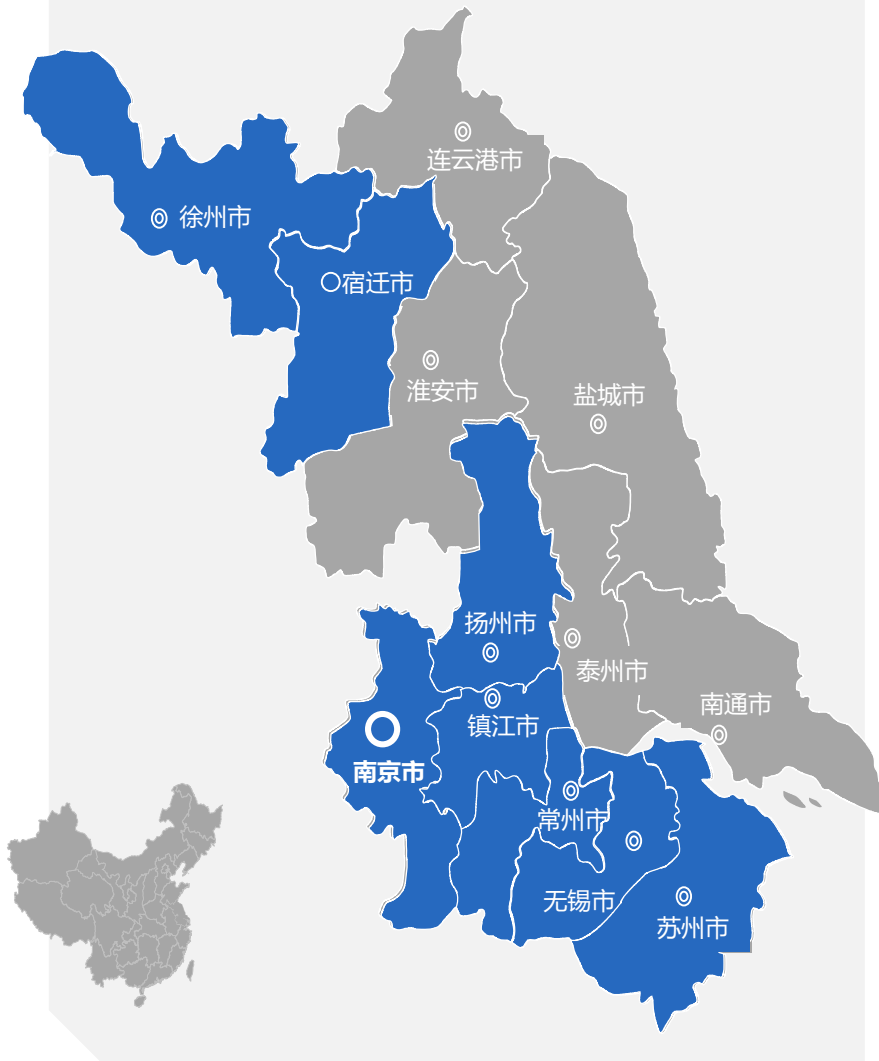


目录

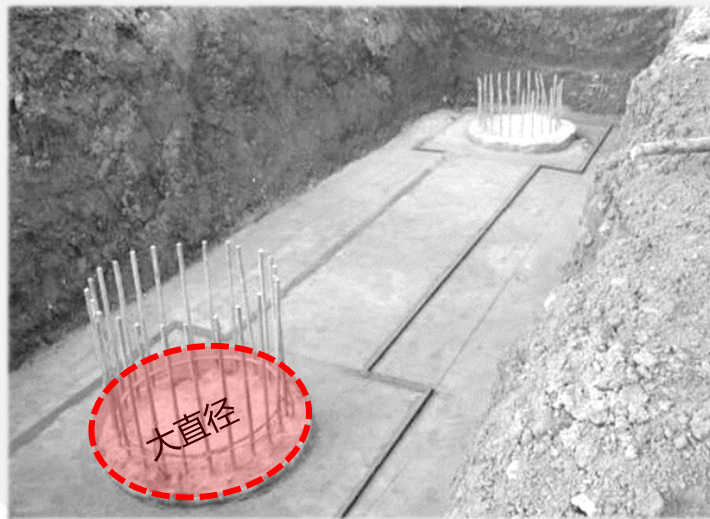
- 一、岩溶区桩基勘察存在的一些问题
- 二、管波探测法的原理及探测方法
- 三、管波探测法在岩溶区桩基勘察中的应用效果



■ 江苏岩溶分布情况



■ 岩溶区城市化发展需要

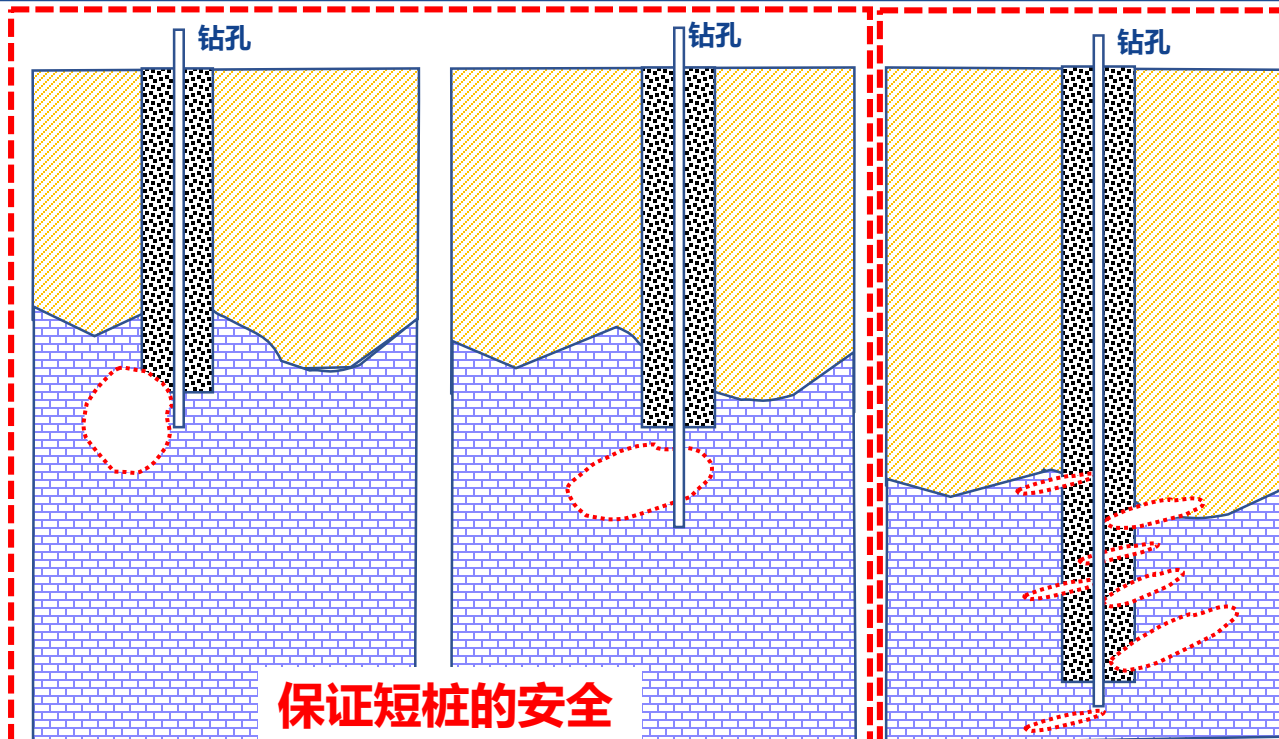
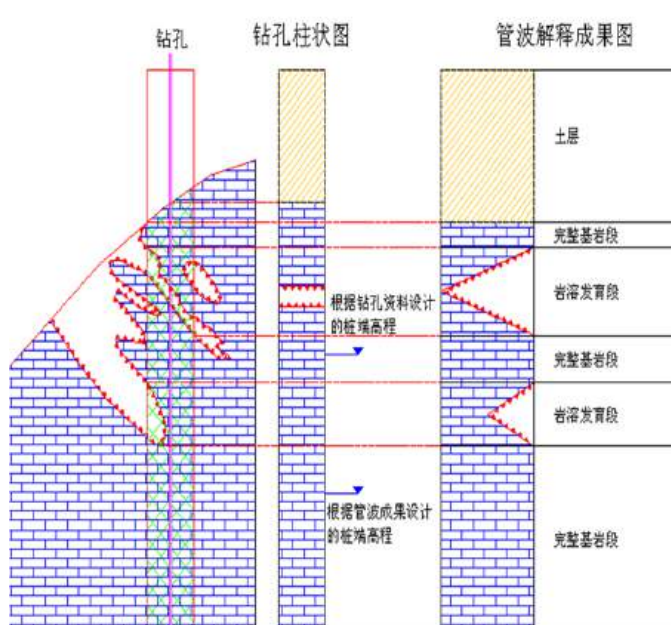


■ 安全精细化施工需要



勘察方法	费用	工期	特点
 一桩多孔	高	长	“眼见为实”，可探明基桩范围内的溶洞、溶蚀裂隙、软弱层等地质情况，可评价基桩持力层的完整性， 工期长、费用高。
 跨孔CT	高	较长	可详细探明桩位、桩侧岩溶、基岩面起伏、临空面等地质情况，可评价基桩持力层的完整性， 精度相对较高，现场施工配合程度要求较高，工期长、费用高、存在盲区。
 孔底雷达	较低	较短	主要应用在 人工挖孔嵌岩桩 ，在实际应用中，往往由于桩基开挖面较窄、且需要等待人工挖孔结束后才能展开测试等种种限制，有着诸多不便，不适用于大深度的桩基岩溶勘察。
 高密度电法	较高	短	成像直观、形象，可以较好的表现出岩溶的发育与分布，野外采集也较为方便， 但其现场干扰因素大，解析时间长，需专业程度高，探测精度低，对岩溶深部反应不全。
 地震反射法	较高	较短	可调查基桩范围内的不良地质，但地质解释结果可靠性低，探测深度较大， 但其现场干扰因素大，解析时间长，需专业程度高，探测精度低，对岩溶深部反应不全。
 管波探测法	低	短	可探测桩基范围内溶洞、溶蚀裂隙、软弱层等情况，可评价基桩持力层完整性； 工期较短、费用较低、精度高，现场技术人员简单培训后便可操作，成果直观，易解读。
 桩底声呐探测	低	短	可探测桩基范围内溶洞、溶蚀裂隙、软弱层等情况，可评价基桩持力层完整性， 需要在桩基成孔后进行，对桩基的设计、施工无超指导作用。

1.3 岩溶区常用的“一桩一孔”存在的不足



保证短桩的安全

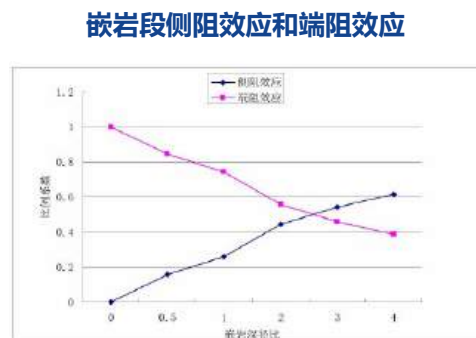
短嵌岩桩
承载力主要由嵌岩端阻力提供，如果桩端半面嵌岩，承载力大大折减，存在工程安全隐患。

桩端下存在岩溶
桩端下岩溶顶板厚度较小，上部岩土层所提供的侧摩阻力比例较小，桩基可能在上部荷载的作用下产生顶板岩体失稳。

串珠状岩溶
由于岩溶发育较强烈，上部土层和嵌岩段能够提供较大的侧摩阻力，可优化桩端嵌入完整岩厚度和下部完整岩厚度。

嵌岩段侧阻效应和端阻效应

嵌岩深径比	侧阻效应	端阻效应
0.0	0.000	1.000
0.5	0.154	0.846
1.0	0.259	0.741
2.0	0.444	0.556
3.0	0.540	0.460
4.0	0.615	0.385



【国标4.9.4】对嵌岩桩，应钻入预计嵌岩面以下3~5d，并穿过溶洞、破碎带，到达稳定地层。

优化长桩的嵌岩深度

采用“一桩一孔”势必会遗漏桩身穿越段的岩溶，给钻孔桩、冲孔桩施工带来隐患，极易在施工过程中产生较多的工程纠纷。

在采用可靠的技术手段，完全可以综合考虑上部荷载、侧阻力，优化桩端嵌岩深度和桩端下完整岩厚度，控制桩长、降低施工难度和工程造价。

1.4 采用“一桩一孔”勘察手段造成的工程隐患

图1



图2

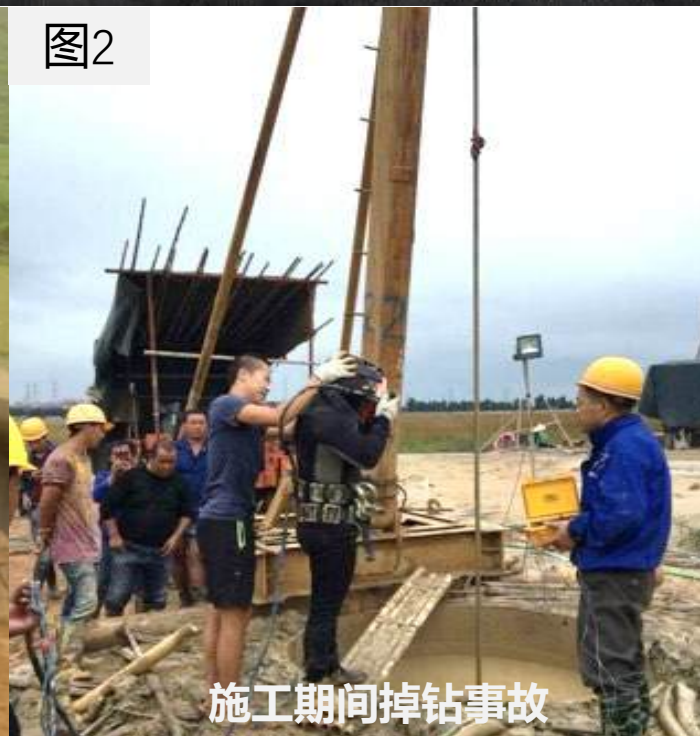


图3



规范要求桩端全断面入岩

桩基规范

对于嵌岩桩，嵌岩深度应综合荷载、上覆土层、基岩、桩径、桩长诸因素确定；对于嵌入倾斜的完整和较完整岩的**全断面**深度不宜小于0.4d且不小于0.5m，倾斜度大于30%的中风化岩，宜根据倾斜度及岩石完整性适当加大嵌岩深度；对于嵌入平整、完整的坚硬岩和较硬岩的深度不宜小于0.2d，且不应小于0.2m。

地基基础设计

桩底进入持力层的深度，宜为桩身直径的1倍~3倍。在确定桩底进入持力层深度时，尚应考虑特殊土、岩溶以及震陷液化等影响。嵌岩灌注桩**周边嵌入**完整的和较完整的未风化、微风化、中风化硬质岩体的最小深度，不宜小于0.5m。

施工中常因地质问题引起纠纷

由于岩溶发育的复杂性，单一的逐桩钻探，难以查明桩身、桩端的岩溶情况。在工程实践中由于勘察工作存在的不足，经常导致设计、施工单位的变更，对勘察单位的声誉产生不良的影响。



施工入岩判定依据不充分

目前桩基工程分部验收时，工程质监部门会要求勘察单位配合桩基单位提供桩基入岩鉴定单。

如果在岩溶发育区采取单一的钻探手法，无法保证桩端全断面/桩周边嵌入完整岩的要求，而勘察单位提供的桩基入岩鉴定单，如后期工程出现质量问题，为自己留下了隐患。



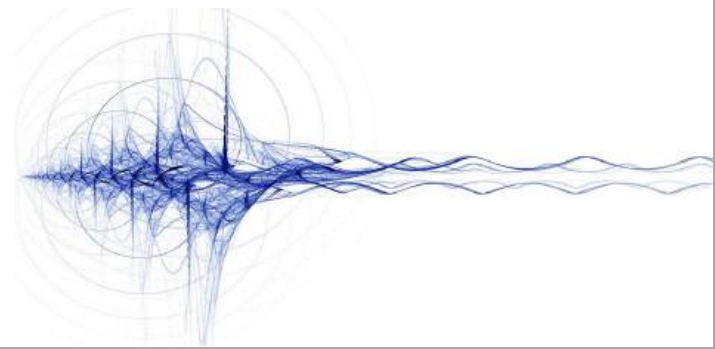
这锅真的要我背吗

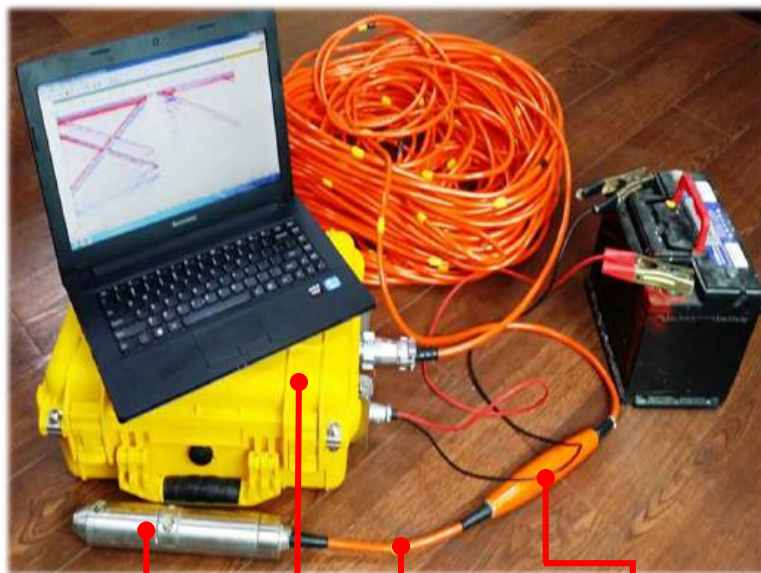




目录

- 一 岩溶区桩基勘察的常用方式
- 二 ✓ 管波探测法的原理及探测方法
- 三 管波探测法在岩溶区桩基勘察中的应用效果





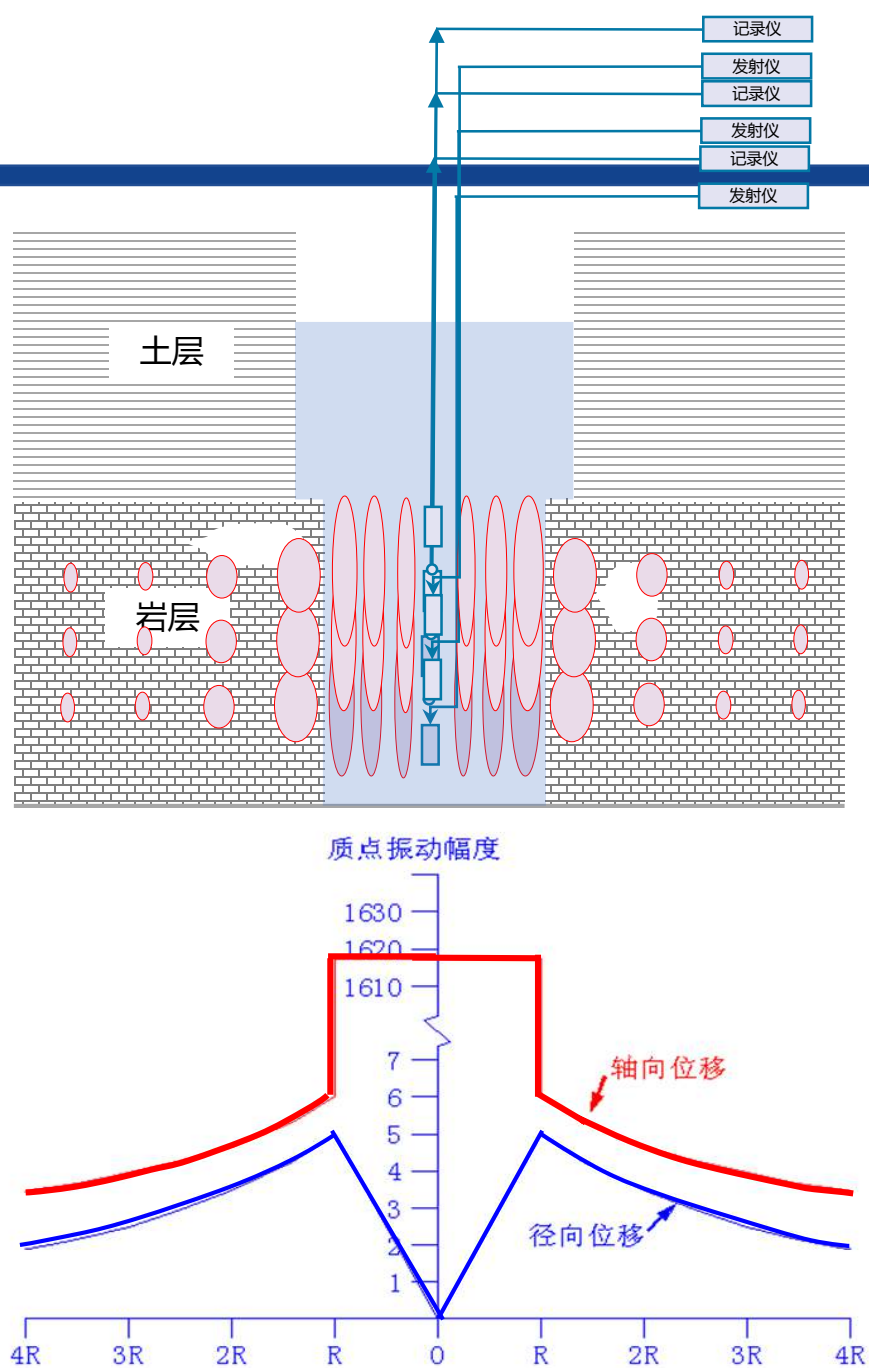
发射换能器

激发记录仪

测点位置

接收换能器

发射换能器和接收换能器按固定间隔放入有孔液的钻孔中，发射换能器产生的振动与孔液作用，在孔液和孔壁上产生管波，记录仪同步记录接收换能器振动信号。移动探测位置，把同一主频探测的不同深度的探测点的振动记录按深度排列，得到时间剖面。



管波探测的基本原理

1 什么是管波

钻孔中的孔液与钻孔周边的岩土体，孔液的振动会在孔壁及其附近产生沿孔壁传播的界面波。

2 反射界面

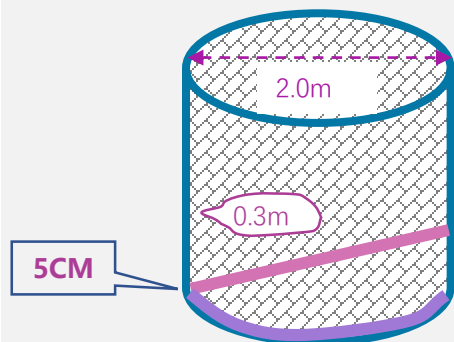
- 1、孔径变化处；
- 2、液面处；
- 3、孔底；
- 4、孔壁波阻抗差异界面。

钻探中已知

通过分析反射管波异常来判定钻孔旁侧岩性差异及不良地质体。

探测范围、分辨能力

1 探测范围



$$\lambda = 2.5\text{m}$$

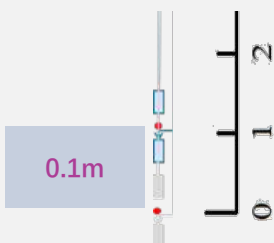
2 分辨能力及定位误差

大于0.3m孔旁岩溶；

大于5cm裂隙、软弱岩层、桩底沉渣。

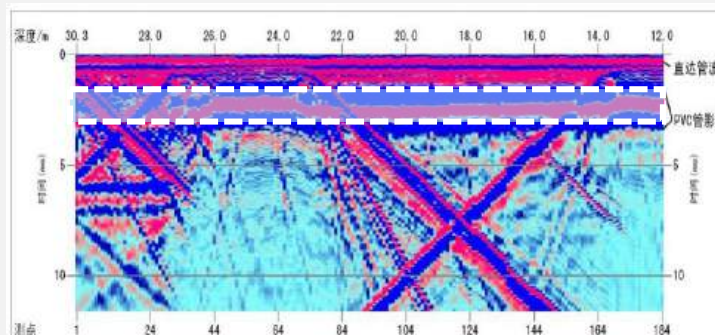
3 定位误差

小于0.1m

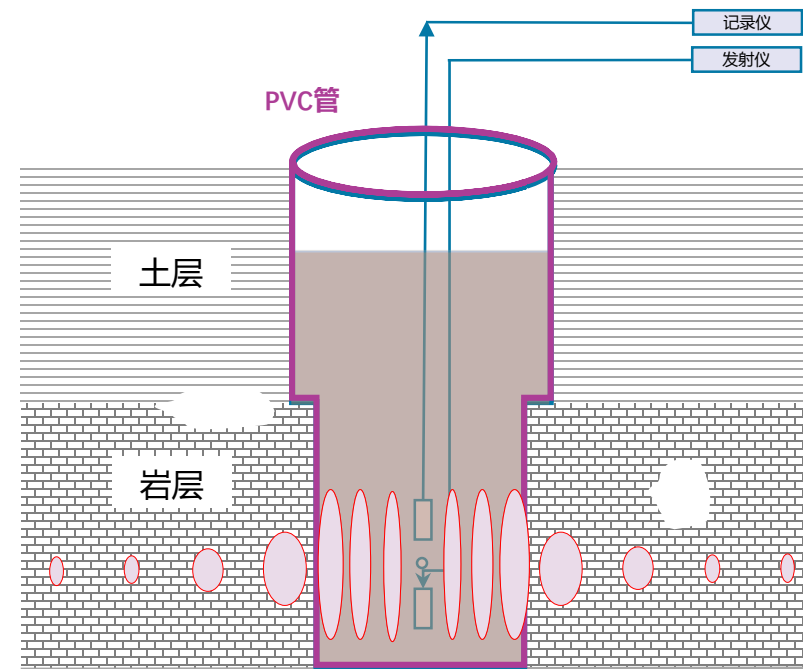
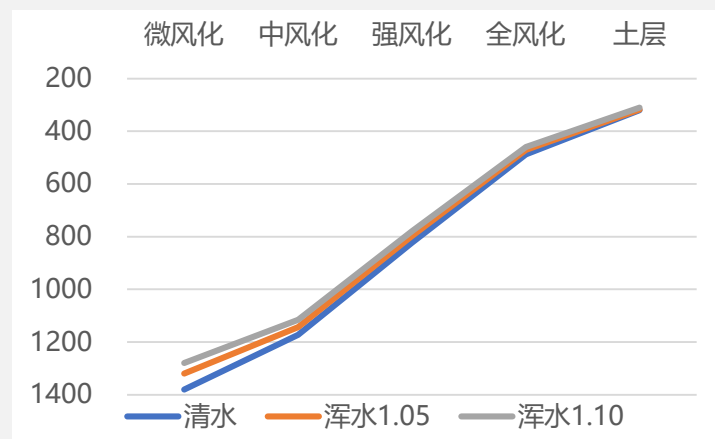


影响因素

1 钻探施工中使用的套管

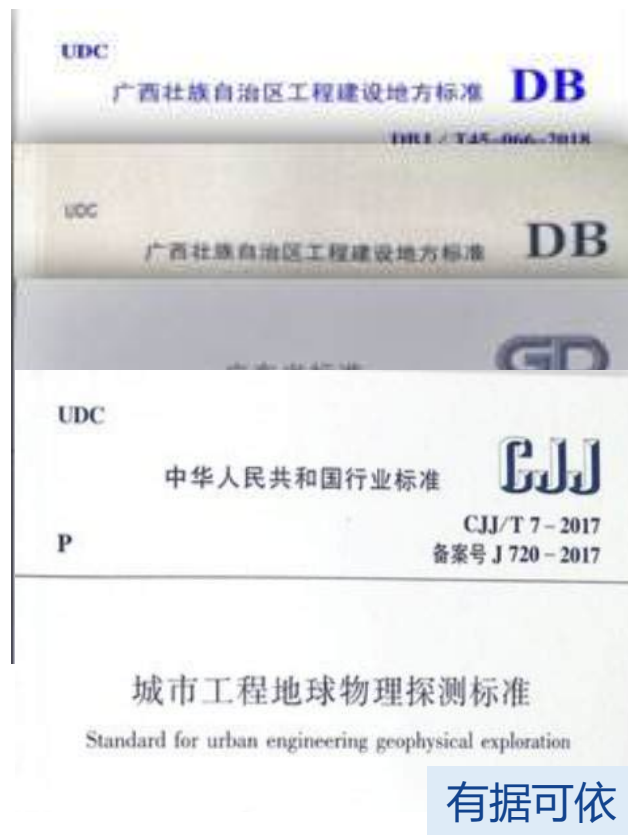
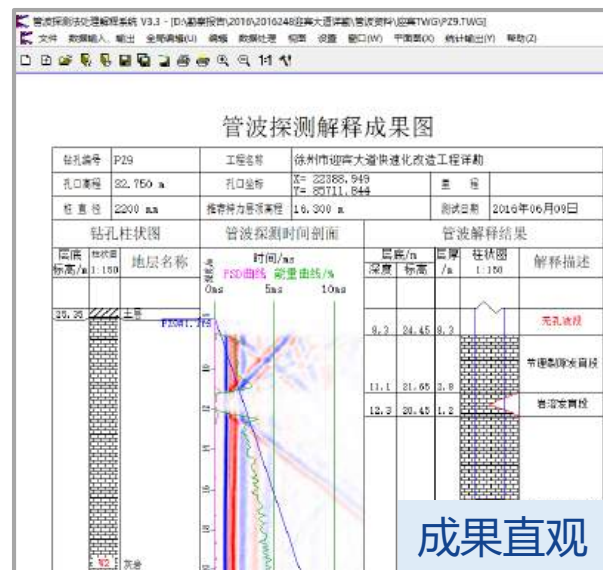
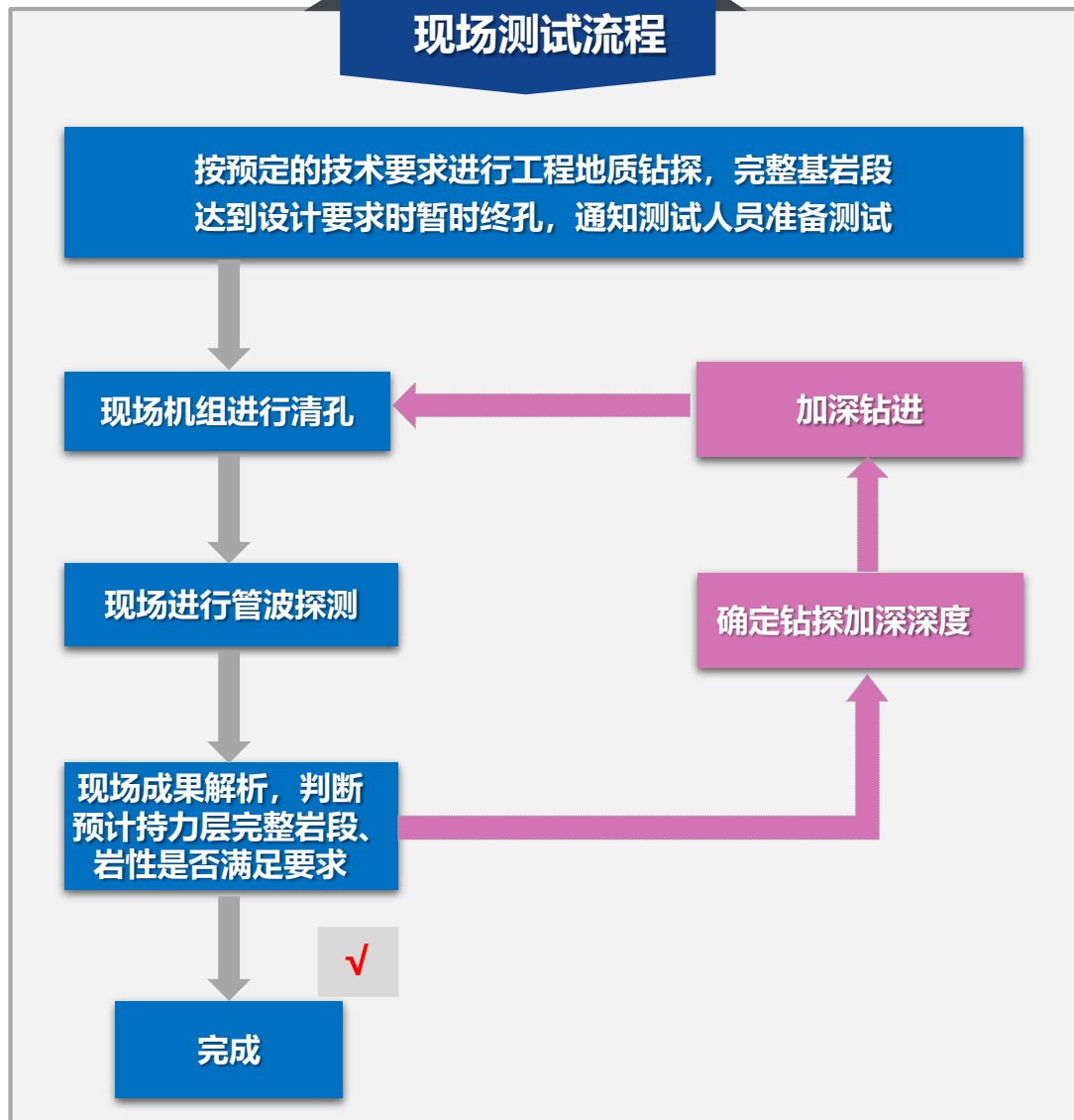


2 钻探施工中使用的孔液



- ✓ 范围可满足大部分钻孔桩要求；
- ✓ 探测精度高，定位误差小；
- ✓ 探测过程受外部环境影响小。

现场测试流程



有据可依

管波图像特征与岩土层的对应关系

岩土组合	岩土横波波速 (m/s)	岩土密度 ($\times 1000\text{kg/m}^3$)	管波波速 (m/s)
微风化岩溶发育段	1.直达波能量很弱或不可见; 2.70	2.70	≥ 1280
中风化	900~2000 1.直达波速度变低、波组向下弯曲, 能量很弱或不可见;	2.25	940~1280
强风化 软弱夹层	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;	2.00	600~940
全风化	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。	1.80	
土层	1.直达波速度稍低、波组向下弯曲, 能量变弱;	1.80	≤ 310
溶蚀裂隙发育	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。		

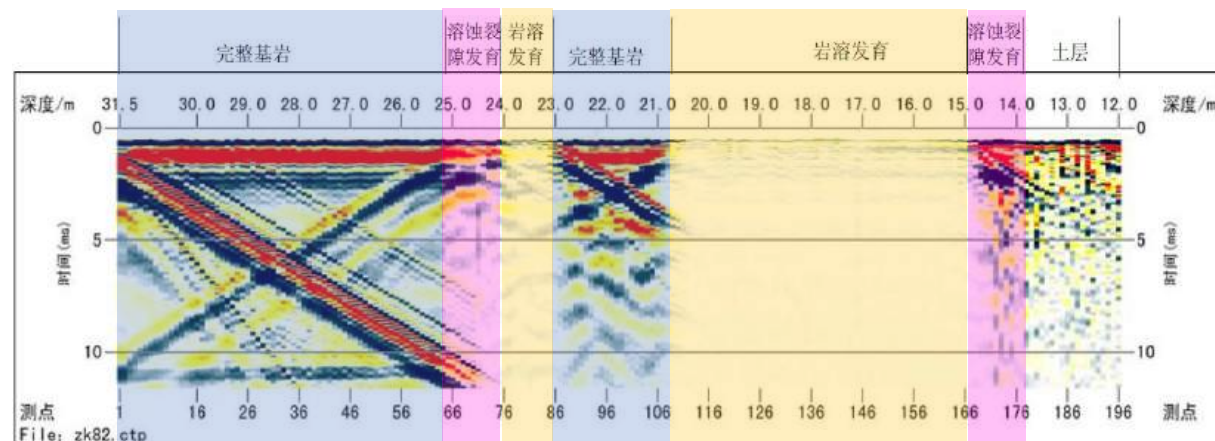
在排除孔底、孔液面、孔径变化、套管等因素引起的反射后, 根据管波的反射特征, 判定孔旁存在不良地质体(洞穴、溶洞、软弱夹层、溶蚀、裂隙)。

a、界面反射能量强、频率低、上下反射界面之间的能量存在消散现象, 是**洞穴(岩溶发育段)**。

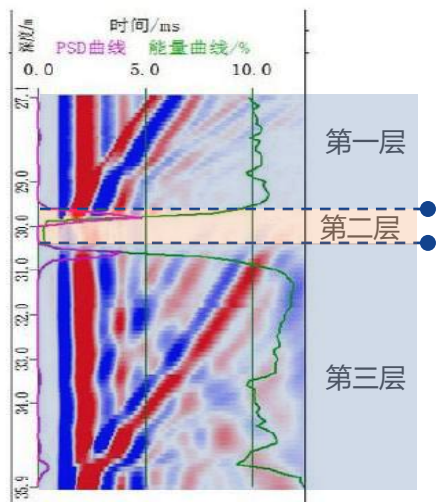
b、当溶洞与探测孔存在水力联系或软弱夹层的剪切波速度比孔液压缩波速度小时, 在管波时间剖面中表现为管波能量消散, 即直达管波低, 同时该处的反射管波能量低、频率高, 这是**溶蚀、裂隙的反映**。

c、直达波组不存在向下弯曲变化、直达波以后无明显的倾斜的直线型反射波组且不存在管波能量消散现象, 这种特征可作为判定孔旁基岩完整的判别依据

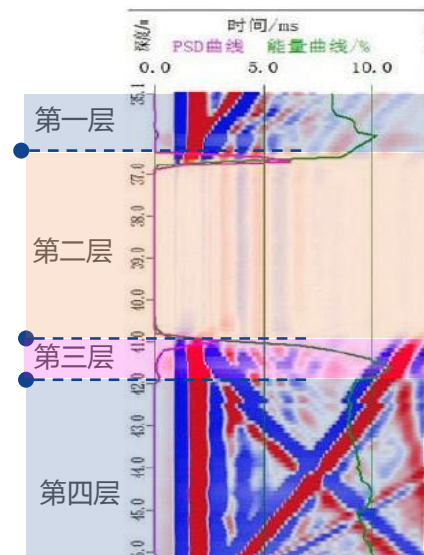
d、倾斜的反射波组即为不良地质体边界处的反射管波, 不良地质体的顶底界面深度为反射管波同相轴时距曲线与零时间的交点对应的深度。



管波的 PSD 标准类似于基桩完整性检测中的声波透射法的 PSD 标准，PSD 曲线每一个极强的峰值，都代表着这一点两边的能量有了极大的差值，曲线的峰值即该处为两个岩土层差异的分界面，利于这一特征勘察人员可以判断孔旁岩土体性质（溶洞、岩溶裂隙发育段、风化程度等）。



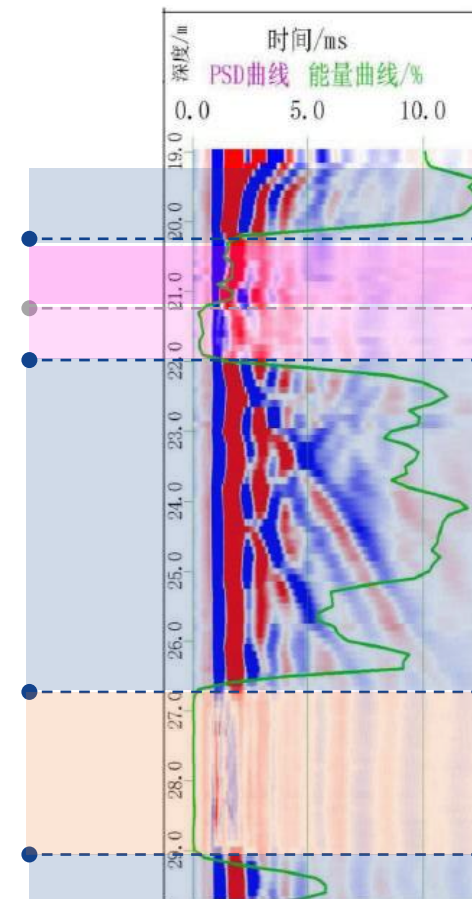
29.8m和 30.5m 处各存在一个峰值，即这是两个岩土层差异的分层界面。



在 36.8m 和 41.0m 处，出现两个十分明显的峰值，即这是两个岩土层差异的分界面。

第二个峰值之后的 41.7m 出现 PSD 曲线有一个小的峰值。

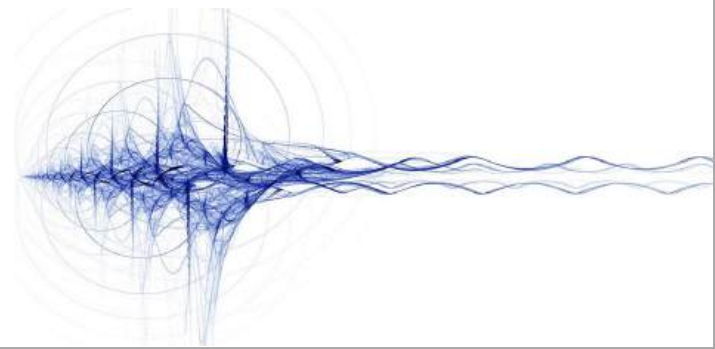
- 20.2~22.1m 出能量值大致在5%~15%之间，所以看出该层为强风化层（软弱岩层）。
20.2~21.1m、21.1m~22.1m 有两段。
21.1~22.1m 风化程度比 21.1~22.1m 要更严重。
- 19.0~20.1m、22.1~22.7m、23.9~25.0m 这 3 段的能量值均大于 80%，可以看出这几层为中微风化层。
- 26.7~29.2m 处能量曲线接近 0 值，岩溶发育段或全风化层；

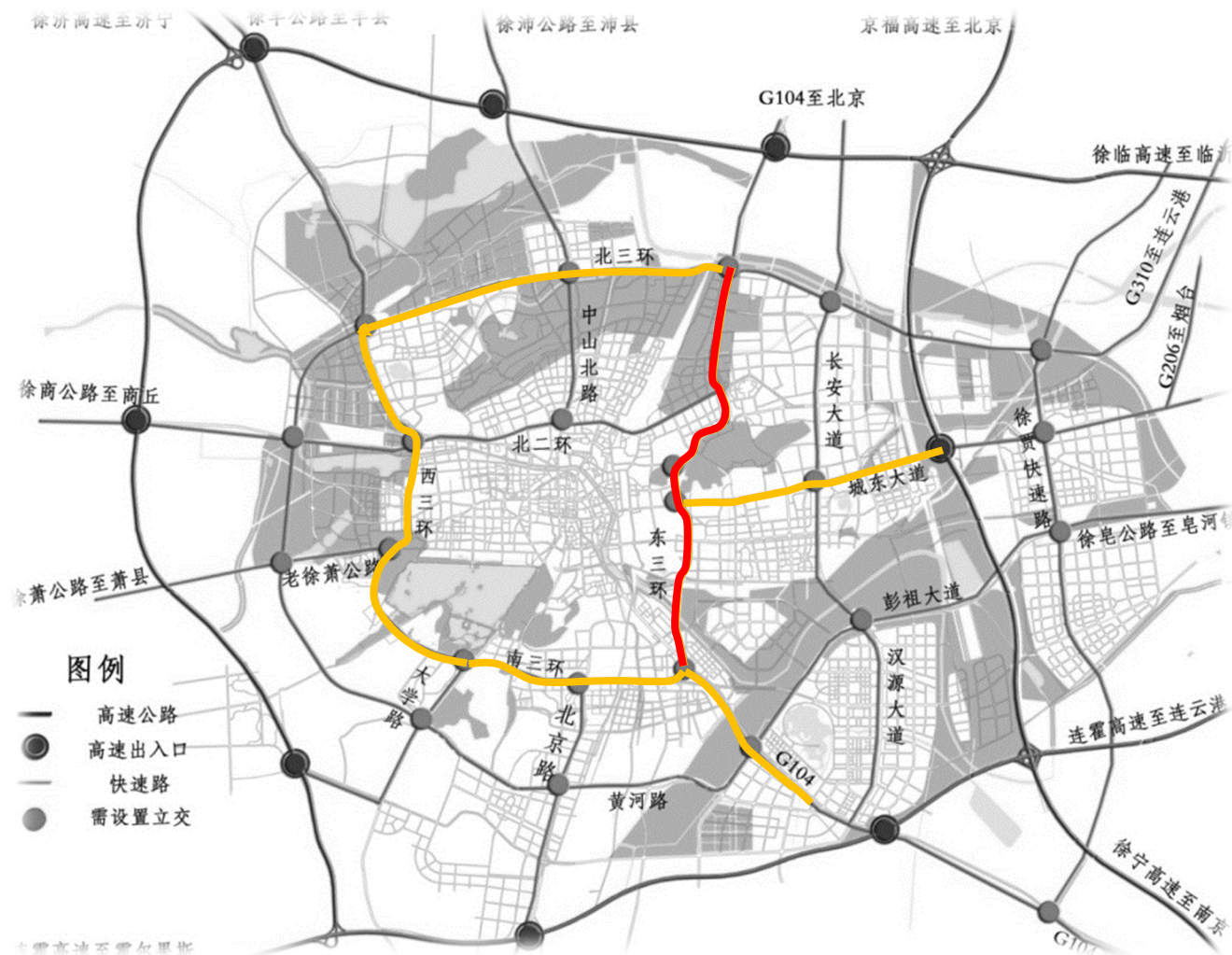




目录

- 一 岩溶区桩基勘察的常用方式
- 二 管波探测法的原理及探测方法
- 三 ✓ 管波探测法在岩溶区桩基勘察中的应用效果





三环东路高架，总长约14.81km，桥梁桩基多采用大直径嵌岩桩基础，工程区域内普遍分布有奥陶、寒武系灰岩，岩溶较发育。



设计要求

- 1、应按规范要求查明桩身全端面地质情况；
- 2、确保桩底以下3D桩径且不小于5m范围内无岩溶。
- 3、根据岩溶发育情况优化嵌岩深度，桩下最小安全岩层厚度。
- 4、提出岩溶处理的指导性意见。

建设单位要求

- 1、工程安全；
- 2、施工安全；
- 3、节约造价；
- 3、配合入岩鉴定。



桩基规范

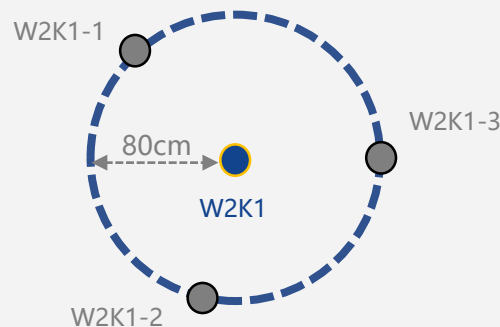
对于嵌岩桩，嵌岩深度应综合荷载、上覆土层、基岩、桩径、桩长诸因素确定；对于嵌入倾斜的完整和较完整岩的**全断面**深度不宜小于0.4d且不小于0.5m，倾斜度大于30%的中风化岩，宜根据倾斜度及岩石完整性适当加大嵌岩深度；对于嵌入平整、完整的坚硬岩和较硬岩的深度不宜小于0.2d，且不应小于0.2m。

地基基础设计

桩底进入持力层的深度，宜为桩身直径的1倍~3倍。在确定桩底进入持力层深度时，尚应考虑特殊土、岩溶以及震陷液化等影响。嵌岩灌注桩**周边嵌入**完整的和较完整的未风化、微风化、中风化硬质岩体的最小深度，不宜小于0.5m。

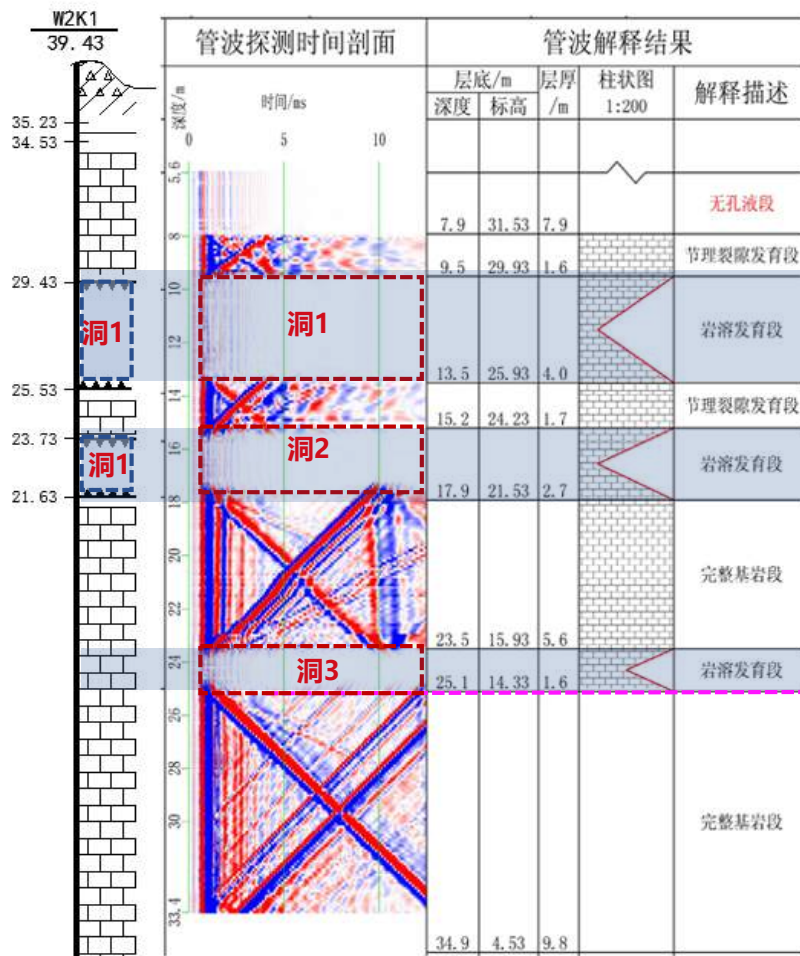
管波探测法适用试验

- ◆ 《公路工程地质勘察规范》JTG C20-2011第7.1.7条要求岩溶区桩基勘探“宜在方法试验的基础上选择物探方法与钻探相结合综合勘探”。
- ◆ 管波探测技术在徐州地区尚无使用经验，为了确保方法可行，进行验证试验。
- ◆ 选取一个桩位在桩中心布置一个管波探测孔，在中心距80cm处布置3个钻探孔，4个孔孔深均钻至35m

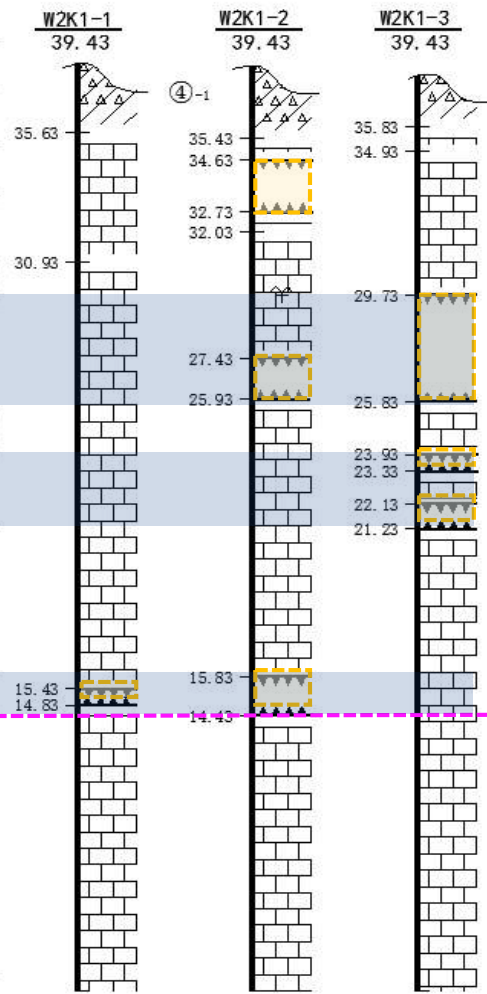


3.2 管波探测法适用情况——对比试验

钻孔桩状图



3个验证钻孔的桩状图



水平间距(m)	1.39	1.39
---------	------	------

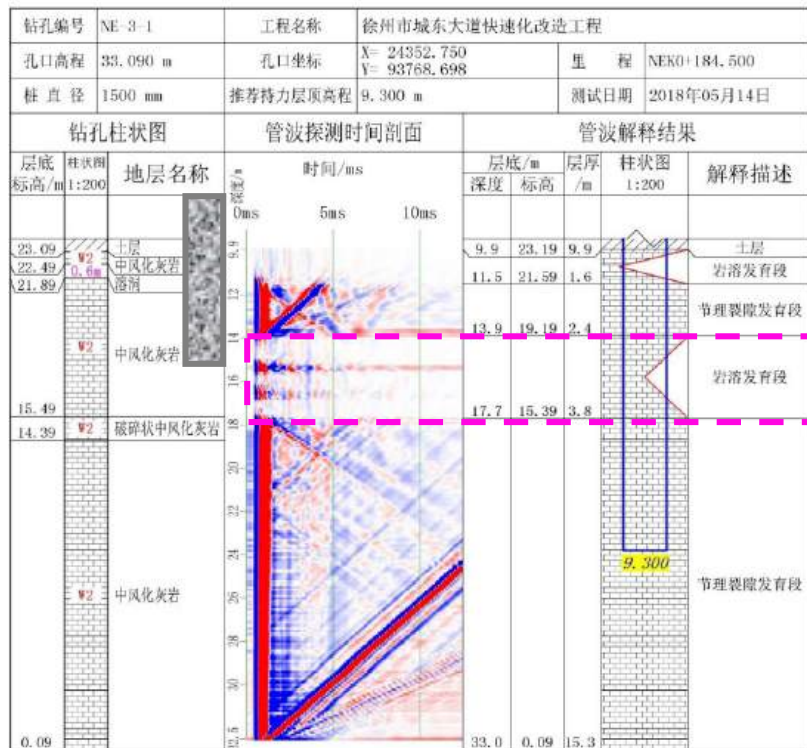
对比结果

- W2K1钻孔仅在25.53 ~ 39.43m和21.63 ~ 23.73m段揭示有2个岩溶发育
- 管波探测成果解译在14.43 ~ 29.93m段有3个岩溶发育,解译成果比钻孔揭示的范围大。
- 3个验证孔分别在不同深度揭示不同大小溶洞,综合4个钻孔方可确定持力层位置。
- 管波解译14.33 ~ 15.93m的岩溶发育段在1号和2和验证孔中均得到了证实。



3.3 部分桩位管波探测成果

管波探测解释成果图



钻孔：在预计桩端持力层附近岩芯较完整，未见溶洞，仅在裂隙面有轻微溶蚀现象。

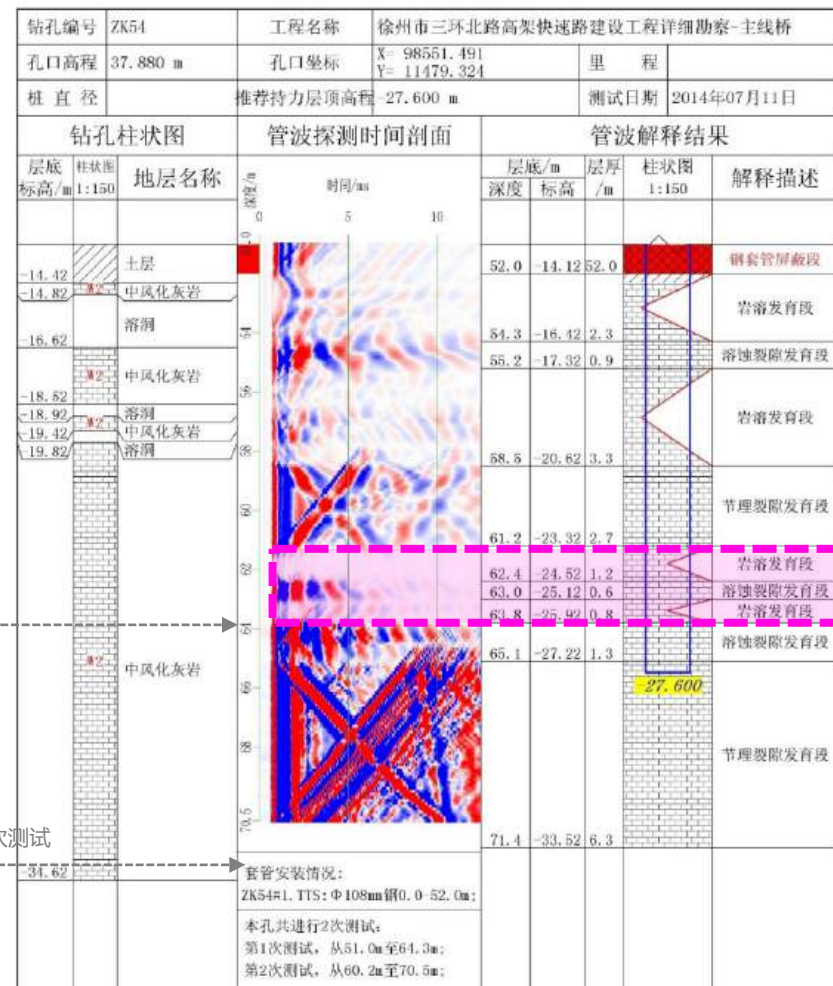
管波：探测成果揭示在13.9-17.7m之间有3.8m的岩溶发育段。

通过钻探结合管波有效避免了桩端嵌入岩溶发育段。

3.3 部分桩位管波探测成果



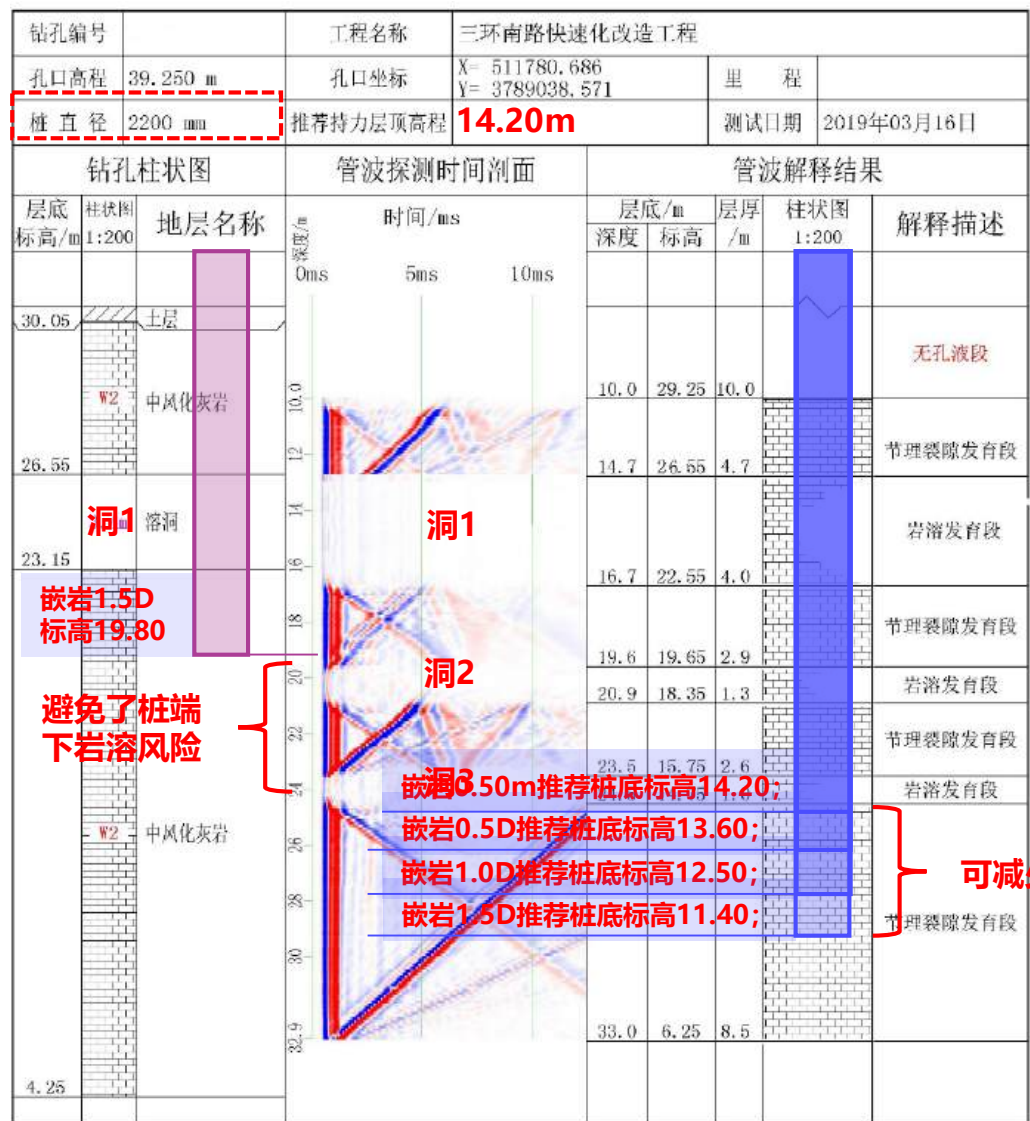
管波探测解释成果图



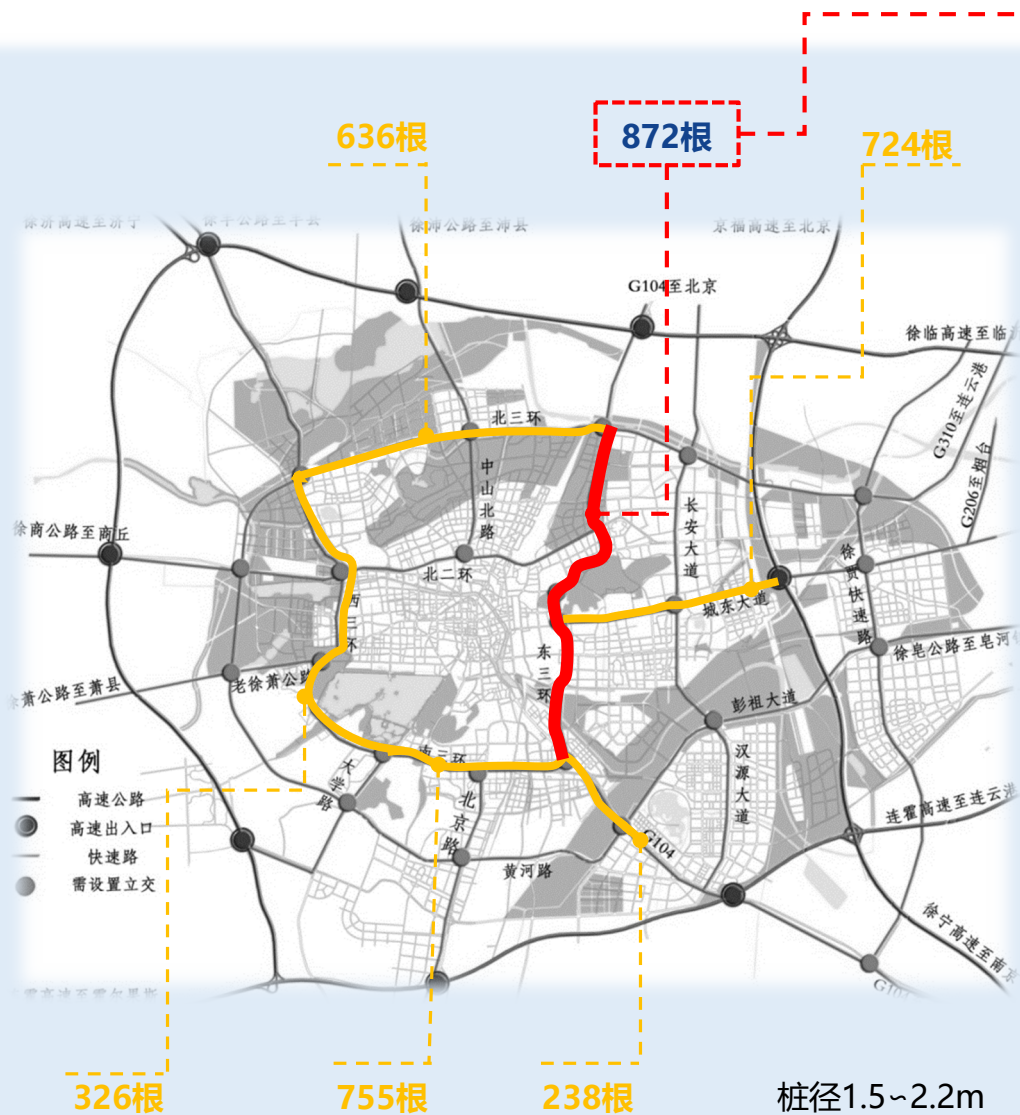
管波: 探测成果揭示在61.2-63.8m之间有2.8m的岩溶发育段, 不能满足桩端持力层要求。

钻孔加深重新测试

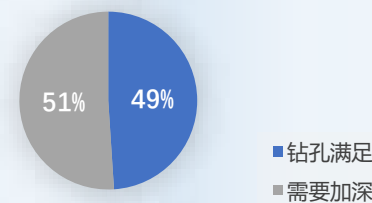
3.4 解析成果优化嵌岩深度及指导施工作用



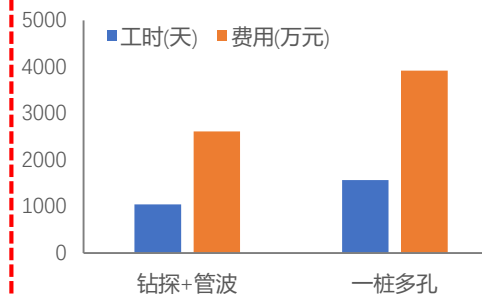
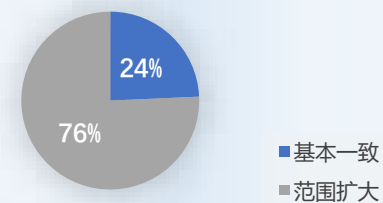
管波解释分类	持力层选择	成桩时建议
完整基岩段	基岩完整, 岩质坚硬, 无溶洞; 在厚度达到设计要求时, 可作为持力层;	可用大冲程, 冲孔进度慢。
节理裂隙发育段	基岩较完整, 岩质较硬, 裂隙发育, 无大溶洞。厚度和强度达到设计要求时, 可考虑为持力层。	可用大冲程, 冲孔进度稍慢
溶蚀裂隙发育段	宏观上表现为基岩, 存在溶蚀现象及小的溶洞、裂隙发育, 部分包含层厚较小的完整基岩或局部夹有岩状强风化岩, 不宜作为端承桩持力层。	施工时可能出现漏浆、偏锤现象, 不宜用大冲程, 冲孔进度稍快。
软弱岩层	宏观上表现为基岩, 风化程度大, 岩体破碎, 岩质较软, 不应作为端承桩持力层。	可用大冲程, 冲孔进度较快。
岩溶发育段	宏观上表现为岩溶及溶蚀裂隙发育, 部分包含层厚较小的完整基岩, 严禁作为端承桩持力层。	可能出现快速滑浆、偏锤、掉锤、卡锤、塌孔现象, 不宜用大冲程。



钻探法和钻探结合管波对比



岩溶探测范围增加情况



桩数(根)	方法	工时(天)	费用(万元)
872	钻探+管波	1046	1570
2616	一桩3孔	2616	3924

- ✓ 根据目前完成的3500多根管波探测的桩位，推荐的桩端持力层在后期桩基检测中没有发现嵌入岩溶中或半面嵌岩的现象，保证了工程的安全。
- ✓ 经验算，部分嵌岩桩深度可缩短2m~3m，约有8%的桩基可在溶洞顶终孔，无需穿越溶洞，平均缩短桩长2.5m，降低施工难度、节约工程造价，提高施工进度。
- ✓ 桩基单位根据探测成果分别采取了相应的工程措施，有效的降低了施工过程中的卡钻、掉钻等施工安全风险，提高了施工进度。
- ✓ 由于勘察过程中采取了管波探测法，后期桩基施工未发生因岩溶勘察不足导致设计变更，提高了勘察单位的声誉。



勘察单位

- 1、利于管波探测技术，可准确查明桩端下、桩身内的岩溶、岩体完整程度、软弱夹层发育情况。
- 2、结合管波探测成果推荐桩端持力层，和嵌岩桩入岩深度更加安全、经济。



设计单位

- 1、根据岩溶发育情况优化嵌岩深度、桩下最小安全岩层厚度、同一承台下不同桩长的施工顺序等。
- 2、对不同位置的溶洞及不同发育程度的岩溶，提出针对性的处理意见。
- 3、在管波探测成果基础上更利于桩基工程的岩溶处理措施费估算。



施工单位

根据管波探测成果结合钻孔柱状图可提前判断岩溶位置、发育程度，评价对成桩的影响，准备应急材料、制订详细的桩基施工预案，降低施工风险，提高施工进度。



时效性：探测时间半小时，解析时间10分钟；

直观性：解析后的成果图清晰易懂，无需培训可辨别溶洞位置；

经济性：在钻探基础上加以探测，费用为单孔钻探的1/5；

安全性：基桩完工后，采用低应变、钻芯法检测，未发现桩底及持力层存在溶洞、溶蚀裂隙、软弱夹层或半边嵌岩等缺陷；根据桩基施工情况总结及反馈，管波探测法对岩溶的探测准确率达98%以上，深度误差在0.1m以内，增加沉桩安全性；



岩溶是一种分布复杂的自然现象，宏观上虽有特定发育规律，但在小范围内受多种因素影响，分布呈随机性，要完全查清岩溶的分布情况是困难的，尤其是小型溶洞、溶隙，更是分布无常，难以把握。

从工程实践来看，采用钻探结合管波勘探法，可以有效地查明桩底岩溶、溶蚀、软弱夹层发育情况和持力层的完整性。

- 勘察设计人员可根据探测成果结合桩位荷载、岩溶发育情况优化桩端嵌岩深度；施工单位在钻孔、冲孔过程中提前采取相关措施，可及时避免塌孔、地面塌陷、桩机倒塌等事故的发生，完全可以做到杜绝桩基半边嵌岩、桩位持力层存在溶洞的安全隐患。
- 在岩溶区嵌岩桩采用“钻孔+管波”的勘察方法可显著提高勘察效率、降低工程设计、施工风险，勘察成果业主、设计、施工单位认可度高。





江苏省地质工程勘察院
Geo-engineering Investigation Institute of Jiangsu Province

感谢聆听，欢迎交流！

严邦全 2026年4月

江苏省地质工程勘察院有限公司

地址：南京市江宁区梅林街17号

邮编：211102

电话：13601435321

传真：025-52798615

<http://dzhjy.jsdk.cn/>

