

应用反射波法进行桩底探岩

胡二中, 彭振斌, 黎超群

(中南大学, 湖南长沙 410083)

摘要: 分析研究表明, 反射波探岩的原理类似于测桩, 通过分析激振波在介质中传播时遇到波阻抗不同介质形成的波阻抗界面产生的反射波, 从而判断桩底有无溶洞、破碎带或软弱夹层。笔者论述了如何辨别反射波来自桩底或桩周的依据和方法。工程实例表明, 采用反射波进行桩底探岩不仅效率高、费用省, 而且准确度高, 是一种可以推广的方法。

关键词: 反射波法; 钻探; 桩; 溶洞; 破碎带

中图分类号: P631.4; TU459+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2007)S0-0119-03

地基与基础的好坏, 直接决定了建筑物的安危。为了保证大直径桩基持力层为中风化岩(尤其是灰岩)的桩基处于密实的岩层之上, 建筑地基基础设计和检测的有关规范规定终孔时应进行桩端持力层检验^[1-3], 查明桩底以下 3 倍桩径或 5 m 深度范围有无溶洞、破碎带或软弱夹层。此项任务是必不可少的, 通常采用钻探取芯的方法^[4]去完成, 但费用较高、耗时较长。根据物探理论^[5,8]和笔者长期从事桩基检测工作的经验, 可以改用费用少、耗时短的物探方法——反射波法来完成桩底探岩的工作。

1 反射波法检测原理

应力反射波法是以应力波在介质中的传播反射特征为理论基础的一种方法^[6-12]。该方法将介质假定为连续弹性的一维截面均质杆件, 并且不考虑介质四周物质对沿介质传播应力波的影响。当应用反射波法测桩时, 在桩顶施加一瞬态锤击振力后, 将在桩内产生应力波, 由于桩与周土之间的波阻抗差异悬殊, 应力波的大部分能量将在桩内传播, 当桩长 $L \gg$ 桩径 D , 应力波波长 $\lambda \gg D$ 时, 桩可以看作一维杆件, 应力波在桩内传播的波动方程为垂直入射的应力波在桩内传播过程中, 当桩内存在有波阻抗差异界面时, 波将产生反射波和透射波, 反射波将沿桩身反向传播到桩顶, 而透射波继续向下传播。桩身的缺陷、桩底均可以根据反射波的相位、振幅、频率特性, 辅以地层资料、施工记录以及实践分析经验, 对其性质做出确切的判断。

应力波反射波法测桩是以一维波动方程为理论

基础的一种检测技术, 当给桩顶施加振动或锤击等激励能量时, 振动都以应力波形式沿桩身传递, 传递过程是以一维波动方程为数学模型。假设桩为等截面细长杆件, 四周无侧阻力作用, 顶端受到撞击, 杆截面在变形后仍能保持平面, 则微分单元的应变(图 1)为

$$\varepsilon = \partial u / \partial z。$$

式中, u 为 z 方向位移; ε 为位置和时间的函数。

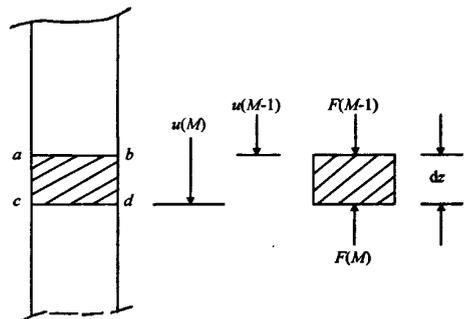


图 1 杆体变形示意

分析杆中任一截面 ab 的受力

$$F(M-1) = A\sigma = A\varepsilon E = \frac{AE\partial u}{\partial z}，$$

则 cd 截面上的受力按泰勒展开形式为(忽略高次项)

$$F(M) = \frac{F(M-1) - \partial F(M-1)}{\partial z dz} \\ = \frac{(\frac{AE\partial u}{\partial z} - \frac{AE\partial \partial u}{\partial z})}{\partial z dz}，$$

式中, A 、 E 为单元截面积和材料弹性模量。微分单元的受力为

$$\Delta F = F(M - 1) - F(M) = \frac{AE\partial^2 u}{\partial z^2} dz,$$

由牛顿第二定律得

$$\Delta F = ma = \rho A dz a = \frac{\rho A dz \partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{AE\partial^2 u}{\partial z^2} dz。$$

由于 $E = \rho C^2$ (其中 C 为应力波沿桩身传播的速度), 上式经化简后得

$$\frac{\partial u^2}{\partial t^2} = \frac{C^2 \partial^2 u}{\partial z^2},$$

此线性偏微分方程的 D'Alembert 解

$$u(z, t) = f(z - Ct) + g(z + Ct),$$

$$u(z, t) = f(z - Ct)$$

为 2 个反向行波的叠加, 假设扰动只有一个方向, 即只有下行波, 则

$$u(z, t) = f(z - Ct)。$$

由于 $f(z + C\Delta t) - C(t_1 + \Delta t) = z - Ct_1$,

所以 $f(z - Ct) = f[(z + C\Delta t) - C(t_1 + \Delta t)]$,

即 $u(z, t_1) = u[(z + C\Delta t), (t_1 + \Delta t)]$,

说明 t_1 时刻的扰动经过 Δt 后沿 z 正向平移了一个距离 $C\Delta t$, 所以 $f(z - Ct)$ 代表了沿 z 轴正向以波速 C 传播的下行波。引入广义桩阻抗 $Z = \rho AC$, 由桩身阻抗变化界面处位移、速度和力的连续条件可得到反射系数 $R_r = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)$, 从而可通过观测反射信号的相位来判断阻抗的变化, 这就是低应变反射波法测桩的理论基础。

用反射波法探测桩底面下 3 倍桩径或 5 m 深度范围内有无溶洞、破碎带或软弱夹层的原理与反射波法测桩基本相同, 都是利用激振波在介质中传播时遇到波阻抗不同介质形成的波阻抗界面产生的反射波来分析、判断有无溶洞、破碎带或软弱夹层。

2 反射波法探岩与测桩的差别

反射波法测桩, 是敲击桩顶面, 检测和沿桩身轴线方向传播的激振纵波在桩身缺陷与桩底形成的波阻抗界面上产生的反射波。反射波法测桩时, 假定桩体为一维截面均质杆体, 在一般情况下, 激振波主要在桩身中传播, 基桩周围的岩石对检测结果通常影响不大。

反射波法桩底探岩是敲击桩底的岩石表面产生的激振波, 此激振波在岩层中传播时遇到由溶洞或软弱岩层形成的波阻抗界面, 便产生反射波。我们用检波器接收并用仪器记录下该反射波, 并进一步通过分析反射波的到达时间, 计算出波阻抗界面到桩底岩层面的距离, 通过分析反射波的强度和波形特征推断该波阻抗界面的地质体的性质。完整的基

岩是一个半空间无限体, 反射波法探岩时, 其激振波是向半空间传播, 接收到的反射波除了来自桩身延伸方向的溶蚀体与软弱层的上表面, 也有可能来自桩身延伸方向四周的岩石(图 2)。所以必须采取一些有效的方法技术对检测到的反射波进行甄别, 加以区分, 确定哪些是桩底溶洞或软弱岩层引起的, 哪些是桩底周围岩体中的溶洞或软弱岩层引起的。

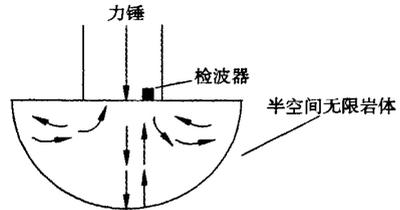


图 2 反射波探岩示意

3 反射波探岩的理论依据与技术方法

3.1 不同地质体的反射波曲线特点

桩底持力层为灰岩地层时, 灰岩中多存在岩溶、破碎带、夹薄弱层等地质现象。不管是哪一种地质体, 只要存在, 在采用反射波法进行测试时, 均会出现反射波异常的现象, 否则, 桩底持力层下部基岩便是完整的。当岩溶、破碎带、夹薄弱层等地质体界面平整时, 在反射波曲线上会出现多次反射。如果遇到岩溶, 不管溶洞里面是水还是气体, 反射均会比破碎带、夹薄弱层等地质体要强烈得多, 我们从反射波的波幅、强度等方面完全可以做出准确判断。因为我们主要是判断桩底面下 3 倍桩径或 5 m 深度范围内有无溶洞、破碎带或软弱夹层, 所以在采用反射波法进行检测时, 不宜采用尼龙锤或橡胶锤, 而要使用铜锤或铁锤, 这样才能在反射波曲线上比较清楚的反映桩底浅部的情况。

3.2 区分反射波来向方法

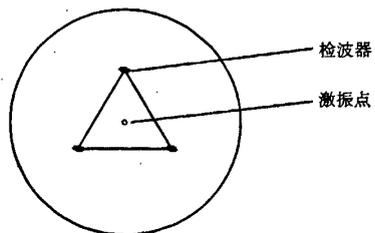


图 3 桩底检波器安装示意

为了确定桩底反射波产生的部位, 必须采用 2 个以上检波器同时检测, 最好将 3 个检波器同时安放在以桩轴为中心的等边三角形的 3 个顶点上(如图 3), 在桩底面的中心点激振, 若反射波同时达到, 而且反射波的振幅较大, 相位与激振波的相位相同,

则是桩底溶洞或软弱岩层引起的;若反射波到达各检波器的时间不同、振幅有大有小,如与激振波同相,为旁侧溶洞或软弱岩层引起的;与激振波反相者为旁侧高密度岩体引起的。

4 实例分析

4.1 湖南 S 工地反射波法检测曲线

图 4 所示为通过反射波法从桩顶采集到的桩底正常检测曲线,从曲线不难看出,桩底岩体中没有出现可能存在缺陷的反射波,说明被检测桩桩体完整性良好,桩底持力层无明显的岩溶、破碎带、夹薄弱层等地质现象。图 5 所示为通过反射波法从桩顶采集到的桩底存在缺陷的检测曲线,从曲线可以看出,桩底岩体中有存在缺陷的强烈反射波,说明桩底持力层很可能存在岩溶。

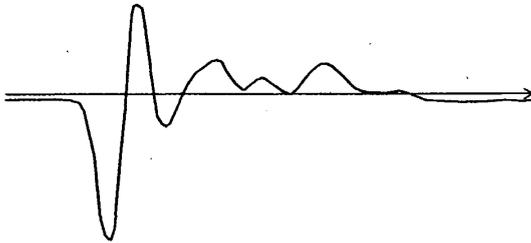


图 4 桩底正常的反射波法典型检测曲线

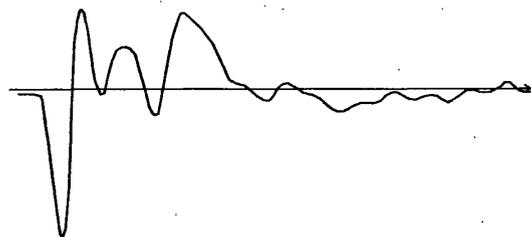


图 5 桩底有溶洞的反射波法检测曲线

4.2 湖南 T 工地实例

在湖南 T 工地通过反射波法从桩顶采集到的部分检测曲线。从图 6 曲线可以看出,桩底岩体中有存在缺陷的强烈反射波,且与入射波反相,说明桩底持力层很可能存在岩溶。

从图 7 曲线表明桩底岩体中同样存在缺陷反射,且有多次反射迹象,但波幅较小,说明桩底持力层很可能存在破碎带,而且破碎带较平整。

5 结论

对 S 工地和 T 工地可能存在溶洞、破碎带或软弱夹层的桩底进行了钻探取芯。结果表明,和反射波曲线反映的情况完全吻合,说明通过反射波法进

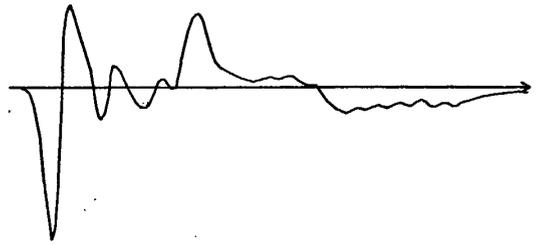


图 6 桩底有溶洞的反射波法检测曲线

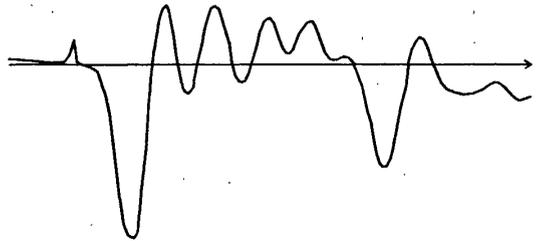


图 7 桩底有破碎带的桩上反射波法检测曲线

行桩底探岩是完全可行的。采用反射波法探岩是一种新的尝试,它具有效率高、费用省的优点,但在运用这种方法时应注意以下几点。

(1) 采用反射波法探岩时必须确保传感器和被检测面很好的吻合在一起,最好能将检测面处理成一平整、光滑的平面;

(2) 必须采用 2 个以上检波器同时检测,最好将 3 个检波器同时安放在以桩轴为中心的等边三角形的 3 个顶点上,以便排除四周反射波的干扰;

(3) 采用反射波法进行桩底探岩时,力锤最好使用铜锤或铁锤;

(4) 当根据反射波曲线不能做出明确判断时,应及时采取钻探的方法进行探岩。

参考文献:

- [1] JGJ106-2003, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [2] GB94-94, 建筑地基设计规范[S].
- [3] JGJ50007-2002, Code for design of building foundation[S].
- [4] 岩心钻探规程[S]. 北京:地质出版社,1983.
- [5] Kolsky H. 固体中的应力波[M]. 王仁. 北京:科学出版社, 1958.
- [6] Whitaker T, Bullen F R. Pile Testing and Pile - driving Formulae [M] Washington D C: Thomas Telford Ltd, 2001.
- [7] 徐天平,柯李文, PIT 低应变试桩理论及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 294 ~ 300.
- [8] 应怀樵. 波形及频谱分析与随机数据处理[M]. 北京:中国铁道出版社, 1985.
- [9] 陈凡,王仁军. 低应变反射波的测试、分析方法的完善[C]. 北京:中国建筑科学院, 1996.

行、下行反射波组,有一组明显的X形特征,中风化岩石在直达波以后,也出现明显的能量较强的倾斜的上行、下行反射波,但仅有一个X形特征。

参考文献:

[1] 章成广,王冠贵,刘银斌,等. 伪瑞利波和斯通利波的特性及横

波首至的研究[J]. 地球物理测井,1990,14(6):385.

[2] 饶其荣,李学文. 用于探测孔旁溶洞的管波探测法[J]. 地质与勘探,2004(增刊).

[3] 李学文,饶其荣. 管波及其工程应用[J]. 物探与化探,2005,29(5):463.

[4] 张玉池,李小兰,王宗学. 管波探测方法及其应用[J]. 矿产与地质,2006,20(6):689.

THE TUBE WAVE CHARACTERISTICS OF THE WEAK INTERCALATION

ZHANG Yu-chi^{1,2}, WEN Pei-lin², ZHANG Zhao-Jing¹

(1. Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China; 2. Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the detecting test in the drill hole, the authors studied the tube wave characteristics of sandstone, limestone, marl and clay, and extracted the tube wave characteristic information of the weak intercalation.

Key words: weak intercalation; test of tube wave; characteristics of tube wave

作者简介: 张玉池(1963年-),男,高级工程师,博士,从事工程物探、工程检测、岩土工程勘察等工作。

上接 121 页

[10] Poulos H G. Pile Behavior theory and Application [J]. Geotechnique, 1997, 39(3):365.

[11] Goble G G, Rausche F. Pile drive ability predictions by CAPWAP [A]. Proceedings of a Conference on Numerical Methods in Off-

shore Piling [C]. London: Institution of Civil Engineers, 1980:29.

[12] 王成华,张薇. 基于反射波法的桩身完整性判别的神经网络模型[J]. 岩土力学,2003,24(6):952.

A DISCUSSION ON THE APPLICATION OF THE REFLECTION WAVE METHOD TO THE PROSPECTING OF DOWN-PILE ROCKS

HU Er-zhong, PENG Zhen-bin, LI Chao-qun

(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A study and analysis of the reflection wave method show that the prospecting of down-pile rocks by the reflection wave method has the same effect as diagnosing pile integrity based on the reflection wave method. Whether there exists a corrosion or a stratigraphic shatter zone or not can be judged on the basis of the curve of the reflection wave method. This paper also deals with the differentiation of the reflection wave derived from the down-pile rocks from that derived from rocks around the pile. In-situ tests show that the reflection wave method is cheap, efficient and accurate in prospecting of down-pile rocks. Therefore, it is worth popularizing.

Key words: reflection wave; drilling; pile; corrosion; stratigraphic shatter zone

作者简介: 胡二中(1970-),男,湖南安化人,博士研究生,讲师,从事岩土工程教学与科研工作,公开发表学术论文数篇。