

文章编号:1003 - 4722(2001)04 - 0059 - 03

# 复杂地质条件对反射波法基桩检测的干扰因素探析

张 宏<sup>1</sup>,刘衍林<sup>2</sup>

(1. 长沙交通学院,湖南 长沙 410007; 2. 中国有色金属工业长沙勘察设计院,湖南 长沙 410011)

**摘 要:** 复杂地质条件是反射波法判断基桩质量缺陷的主要干扰因素之一,利用一维线性杆状体理论推导得到反射系数  $K$ ,提出了复杂地质条件下不同地层的波阻抗差异,在此基础上分析了复杂地层对基桩检测的干扰及其反射波的曲线特征,并通过工程实例证明理论分析的曲线特征与实测结果的一致性。

**关键词:** 反射波法;桩基础;测试技术;分析

**中图分类号:** U443.15

**文献标识码:** A

## Analysis of Disturbing Factors in the Inspection of Foundation Piles with Method of Reflecting Wave in Complicated Geological Layers

ZHANG Hong, LIU Yan-lin

(1. Changsha Jiaotong University, Changsha 410007, China; 2. China Nonferrous Metal

Industry Changsha Exploration and Designing Research Institute, Changsha 410011, China)

**Abstract:** In pile test, a main disturbing factor is the complicated geological layers. With the reflect coefficient  $K$  deduced from the theory of stress wave one - dimension linear bar, this paper presents wave impedance difference of complicated layers. On this base, this paper analyses the disturbance of complicated layers to pile examination and its reflect wave curve features. A consistency between theory analysis and practice is proved by engineering example.

**Key words:** method of reflect wave; pile foundation; testing technique; analysis

### 1 前 言

反射波法检测基桩,其基本的理论依据是将基桩假设为一维线性杆状体来研究应力波在线性杆状体中的传播特性。这种假设当工程地质条件比较单一,且桩周土的波阻抗与基桩的波阻抗有较大的差异时,满足线性杆状体的假定条件,分析、判断桩体质量状况就比较容易。但是,当工程地质条件比较复杂,即在桩长范围内分布有多种地层,且各地层之间的波阻抗差异较大,或桩周土的波阻抗与基桩的波阻抗差异较小时,就不能完全满足线性杆状体的假定条件,分析、判断桩体质量状况就比较困难,容易出现误判现象。因此,要做到在复杂的工程地质

条件下准确地判断基桩缺陷是由地层干扰引起,还是由桩体本身的缺陷所致,是基桩检测工作中难度较大的问题。

### 2 基本理论

#### 2.1 一维线性杆状体波动理论依据<sup>[1]</sup>

利用一维波动理论来研究杆(桩)的波动问题,当考虑均匀等截面直杆的纵向运动,理论推导得到弹性杆状体(桩体)的纵向振动方程为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq l \quad (1)$$

其中,  $u = u(x, t)$  为  $x$  处截面的位移;  $l$  为桩长度。

收稿日期: 2001 - 03 - 24

作者简介: 张 宏(1954 - ),男,高级工程师,1982年毕业于中南大学地球物理探矿专业,工学学士。

$C$  为桩体内的波速。

根据位移连续和力平衡条件,得到在界面  $x = a$  (图 1) 处反射波  $R$  和入射波  $I$  之间的关系式:

$$R(t) = I(t) + \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} I\left(t - \frac{a}{c}\right) \quad (2)$$

从而得到反射系数  $K$  如下式:

$$K = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

式中,  $Z_1 = \rho_1 V_{P1} A_1$ 、 $Z_2 = \rho_2 V_{P2} A_2$  为线性杆状体界面两侧介质的广义波阻抗,根据(2)式、(3)式也可表达为:

$$K = \frac{\rho_1 V_{P1} A_1 - \rho_2 V_{P2} A_2}{\rho_1 V_{P1} A_1 + \rho_2 V_{P2} A_2} \quad (4)$$

(4) 式是基桩检测时,在时域曲线上判断桩体质量的很重要的公式。

## 2.2 检测波形分析的依据

如图 1 所示,当波在桩顶向下传播时,若遇到明显的波阻抗差异界面时,就会产生波的反射,回到桩顶由检波器传到数据采集仪接收记录。由式(4)可知,要在桩顶能接收到反射波,反射系数  $K \neq 0$ 。对于完整桩来说,桩体中不存在波阻抗差异,所接收到的反射波就是桩底反射信号;对于缺陷桩,桩体缺陷部位具有广义波阻抗  $\rho_1 V_{P1} A_1$  的差异界面存在,也就必然产生桩间反射信号。使得  $K$  值在  $-1 \sim +1$  范围内( $K \neq 0$ )变化。依据波动理论,桩体内波阻抗差异,引起反射系数  $K$  值的变化,此时,  $\rho_1 V_{P1} = \rho_2 V_{P2}$ , 当  $K < 0$  时,反射子波与入射波反相,相当于桩体扩径,

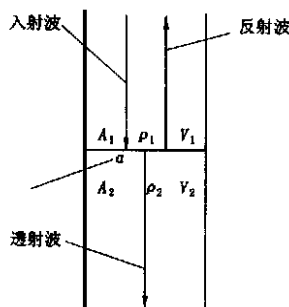


图 1 波阻抗差异界面产生反射、折射和透射

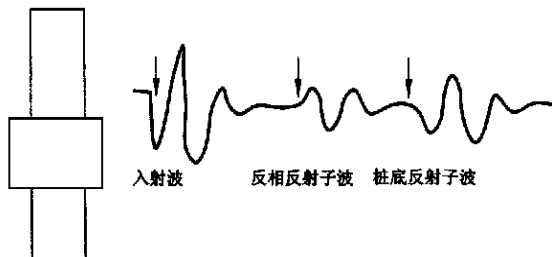


图 2 扩径时的桩体模型和反射曲线

即  $A_1 < A_2$  (图 2); 当  $K > 0$  时,反射子波与入射波同相,相当于桩体缩径,即  $A_1 > A_2$  (图 3)。同理,当  $A_1 = A_2$  的条件下,可根据  $\rho_1 V_{P1}$  与  $\rho_2 V_{P2}$  的差异判断桩体质量的变化。

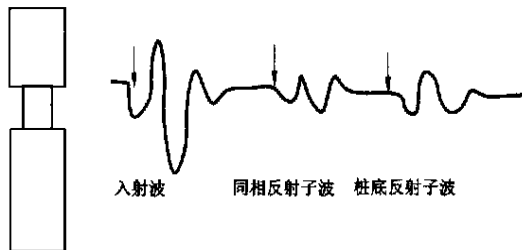


图 3 缩径时的桩体模型和反射曲线

## 3 复杂地层影响因素分析

如前所述利用反射波法进行基桩质量检测是基于—维线性杆状体的理论假定而成立。但是,在实际基桩检测工作中,由于工程地质条件的复杂多变,往往很难满足—维线性杆状体的理论的假定条件。因此,基桩检测工程师在能够充分利用—维线性杆状体理论分析基桩无损检测波形的基础上,还必须掌握与基桩应力波法检测密切相关的工程地质知识及其相关的不同地层的波阻抗差异。

### 3.1 不同地层的波阻抗特性

由波动理论可知,由介质的密度和波在该介质中传播的速度的乘积称为波阻抗,即  $\rho V_P$ 。波阻抗的变化是研究弹性波传播和基桩检测时判断桩体质量的非常重要参数。不同的工程地质条件,由于应力波在传播中的体积效应,在基桩检测中均会对检测结果产生不同的影响和干扰,这种干扰的大小主要取决于基桩本身和围岩的波阻抗差异,基桩混凝土和围岩的波阻抗见表 1。

表 1 几种介质的密度、纵波波速与波阻抗

介质名称	密度	纵波波速	波阻抗
	$g/cm^3$	$m/s$	$10^2 g/s \cdot cm^2$
水	1	1 430 ~ 1 590	14 ~ 16
土壤	1.1 ~ 2.0	200 ~ 800	2 ~ 16
砂层	1.4 ~ 2.0	300 ~ 1 300	4 ~ 26
粘土	1.5 ~ 2.2	1 800 ~ 2 400	27 ~ 53
砂岩	2.1 ~ 2.8	2 000 ~ 4 000	42 ~ 112
石灰岩	2.3 ~ 3.0	3 200 ~ 5 500	74 ~ 165
花岗岩	2.4 ~ 3.1	4 500 ~ 6 500	108 ~ 202
变质岩	2.4 ~ 3.2	3 500 ~ 6 500	84 ~ 208
玄武岩	2.4 ~ 3.3	4 500 ~ 7 500	108 ~ 248
混凝土	2.4	3 300 ~ 4 600	79 ~ 110

### 3.2 复杂地层影响分析

现结合表 1,根据桩身和围岩波阻抗差异,对围岩与基桩的关系分析如下:

(1) 桩周及桩底为同一地层或波阻抗差异较小的交互地层时,满足一维波动理论的假设条件。检测曲线异常则由基桩本身的缺陷所致。

(2) 桩周地层为波阻抗差异较大的交互地层时,由于地层界面处波的反射可能引起曲线异常,所以对检测曲线异常的解释就存在多解性,即有可能是由于基桩本身的缺陷所致,也有可能是由于基桩周围的地层变化所致。此时,应注意排除地层产生异常的可能性后,进一步确定基桩本身是否存在缺陷;当基桩测试的波形出现异常时,要准确判断异常是由基桩的缺陷引起还是地层的变化所引起,单纯从波形上分析解释比较困难,必须借助于有关的地质资料和检测波形进行综合分析研究,方可得到准确的判断结果。

(3) 当桩尖在土壤、砂层和粘土等波阻抗比较小的地层上时(摩擦桩),即如前述,  $(V_P)_{\text{桩身}} > (V_P)_{\text{桩底}}$ ,  $K > 0$  时的情况,桩体混凝土和桩底持力层的波阻抗差异较大,此时桩底反射信号明显,反射子波与入射波同相。

(4) 当桩尖在砂岩、石灰岩、变质岩等与混凝土波阻抗差异较小或接近的岩层中时,此时  $(V_P)_{\text{桩身}} \approx (V_P)_{\text{桩底}}$ ,  $K \approx 0$ ,对嵌岩桩,当桩底嵌固良好时,桩底反射不甚明显。反之,如果桩底反射明显,则说明桩底沉渣过厚,桩底嵌固差。

(5) 当桩尖在花岗岩和玄武岩等与混凝土波阻抗差异较大的岩层中时,此时  $(V_P)_{\text{桩身}} < (V_P)_{\text{桩底}}$ ,  $K < 0$ ,对嵌岩桩,当桩底嵌固良好时,桩底反相反射较明显,反射子波与入射波反相。

4 工程实例

本工程为某单位综合楼,设计沉管灌注桩基础,桩径  $\phi 400$  mm,设计混凝土强度等级 C20。

场地地层分布从上至下依次为:杂填土,层厚 1.50 ~ 2.20 m;淤泥,层厚 2.00 ~ 4.20 m;粉质粘土,层厚 1.20 ~ 7.10 m;再往下为白云质灰岩(设计为持力层)。

检测方法采用反射波法,共检测 19 根桩。经对 19 根桩的检测曲线分析,除 3 根桩桩体完整外,其它 16 根桩的测试曲线均程度不同地存在异常现象,且异常基本出现在 2 ~ 4.5 m 范围内。经判断分析,在排除了施工方面的原因后,基本确定曲线异常为地层的影响所致。由表 1 分析可知,粉质粘土的波阻抗变化范围为  $27 \sim 53 (10^2 \text{g/s} \cdot \text{cm}^2)$ ;淤泥的波阻抗虽然在表中无数据,但结合工程地质特性分析,其

波阻抗应在粘土和水之间,即其波阻抗的变化范围应为  $2 \sim 16 (10^2 \text{g/s} \cdot \text{cm}^2)$ 。显然,淤泥与粘土具有明显的波阻抗差异,复杂地质条件应为检测曲线产生异常的主要原因。

分析判断、对比结果见表 2、图 4。由表 2 可知,2 根桩分别在 2.0 m 和 2.5 m 处出现反射子波,图 4 中箭头所指即为反射子波的异常。当排除地层影响因素后,可判断为桩体完整,无缩径现象出现。最后开挖结果证明,桩体完整,反射子波为地层影响所致。

表 2 检测分析结果

桩号	桩长 m	桩径 mm	曲线分析	不考虑地层影响因素时判定	考虑地层影响因素时判定	开挖验证
74	8.8	400	2 m 处存在与入射波同相反射子波	缩径	桩体完整	桩体完整
72	7.6	400	2.5 m 处存在与入射波同相反射子波	缩径	桩体完整	桩体完整

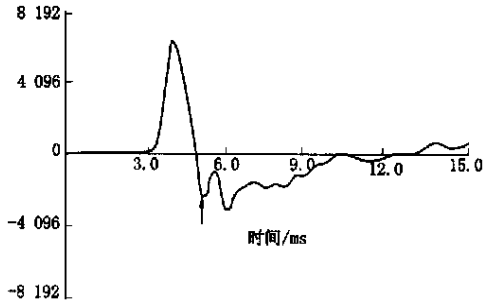


图 4 72 号完整桩地层影响实测曲线

5 结 语

(1) 反射波法基桩检测中,当地层比较单一的情况下,曲线异常主要由基桩本身的缺陷引起,地层的影响干扰较小。

(2) 在地层比较复杂的情况下,即对于交互地层中的基桩,当各地层间波阻抗差异较大时,检测到的波形异常具有多解性,即波形的异常可能是由桩体缺陷引起,也有可能是由地层的分界面反应所致,或两者的影响同时存在。此时,检测人员必须对场地的工程地质条件和施工情况进行综合分析研究,根据地层反应的特征和桩体缺陷特征的比较,消除地层引起的异常后,才能正确判断出被测桩的桩体质量。否则,就会出现误判。

参 考 文 献:

[1] 柳祖亭,顾利平,骆 英等.基桩振动分析与质量监测[M].南京:东南大学出版社,1997.