

# 瑞雷波法在挤密碴土桩复合地基检测中的应用

吴成元 邹桂高

(中国航空工业勘察设计研究院 北京 100086)

**【提要】**本文对瑞雷波法检测挤密碴土桩复合地基承载力的方法、原理进行了探讨,并结合具体工程进行了瑞雷波法和静载荷试验的对比试验,得到良好效果,也说明了瑞雷波法检测的可行性。

**【Abstract】**The theory of the Rayleigh wave method to detect the bearing capacity of complex ground of compaction pile is researched in this paper.

通县中仓小区拟建的43\*、45\*楼位于通县火车站西、东方宾馆斜对面,为六层砖混结构,条形基础,基础埋深0.7m,根据建筑地基勘察报告,该场地地层自上而下为:人工填土、新近代粉质粘土、砂质粉土,以下地层为良好持力层,地下水位离地面约4.8m;由此可见,地基土表层为人工填土和新近沉积土,其承载力只有80kPa,且不均匀,不能作天然地基,根据场地地质情况,决定采用碴土挤密桩复合地基。

制桩成孔时采用长螺旋钻机,孔深5~7m,直径400mm因孔底有水先灌1~2车砖头和灰土夯实至原孔深,以后砖头和灰土交替灌入并立即夯实,夯击锤重1.4~1.8t,夯击数满足连续两击下沉量不大于3cm。该施工方法所形成的桩体外形不很规则,且桩径有所扩大,桩体和原来的土体形成复合地基,与原地基相比,它具有承载力高、压缩性小的特点。

瑞雷波法检测复合地基承载力,虽然在深圳、湖南等地做了不少的工作,但在北京地区尚属首例。这次,我们与中国地质大学(武汉)应用地球物理系合作,首先用瑞雷波法检测桩与桩间土的承载力,来计算复合地基承载力;随后用静载荷试验所得的复合地基承载力进行校检,两者检测的复合地基承载力比较接近,下面对瑞雷波检测的原理

方法及其成果介绍如下。

## 1 测试原理及方法

### 1.1 基本原理及方法

弹性介质的某一局部受到扰动时,由近及远介质中各质点将离开其平衡位置进入振动状态而出现波动现象。在弹性半空间介质中,某一扰动所产生的波场除了由P波、S波组成的体波外还存在表面波:瑞雷(Rayleigh)波和乐夫(Love)波,R波的质点运动由垂直分量和水平分量组成,其质点的振动轨迹为椭圆形,且振动幅度随深度增加而急剧衰减,传播速度略小于横波。

在地面上沿波传播的方向,以一定的道间距 $dx$ ( $dx < \lambda_R$ ,  $\lambda_R$ 为瑞雷波波长)设置多个检波器,设瑞雷波的频率为 $f$ ,相邻两检波器记录的瑞雷波的时间差为 $dt$ 或相位差 $\Delta\varphi$ ,则相邻道 $dx$ 长度内瑞雷波的传播速度为:

$$v_R = dx/dt \quad (1)$$

$$\text{或} \quad v_R = 2\pi f dx / \Delta\varphi$$

$$\text{则波长为} \quad \lambda_R = v_R / f \quad (2)$$

因此,在某一点测得一系列频率的 $v_R$ 值,即得到 $v_R-f$ 频散曲线或转换为 $v_R-\lambda_R$ 曲线。

由于瑞雷波只局限于在地面以下约一个波长范围内传播,因此不同波长的瑞雷波的传播特性基本反映了不同深度的地质情况。显然 $v_R$ 值还与介质的物理特性有关,通过反演频散曲线,可以了解地下某一深度范围内

的地质构造情况,并对岩土的物理性质作出评价。在分层介质中,瑞雷波的速度是随其频率变化而变化的,改变瑞雷波的频率,就能得到不同的瑞雷波的速度和波长。发送频率从高频向低频方向改变,勘探的深度也就由浅向深变化。

由人工激发的瑞雷波,可以在工程地质勘察中对第四系地层划分,确定地基的持力层,划分软弱层的埋深和范围;评价软土地基的加固效果;地下空洞及掩埋物探测;场道面质量无损检测等。

目前瑞雷波法勘察的工作方法和技术(包括仪器装备、施工技术/数据处理系统)已趋成熟。

### 1.2 仪器装备

本次承载力检测是根据我们现有仪器配置如下:

(1) DZ-80型信号源及GF-80型功率放大器

(2) DZ80型电磁激振器

(3) INV-303型数据采集分析系统

(4) 8Hz检波器 4只

### 1.3 工作方法与技术要求

根据所要解决的具体问题的不同,野外所要采取的工作方法也不尽相同。

本次工作是采用稳态激振瑞雷波检测。

如图1所示,发送某一频率 $f$ ,对地面上两个检波点, $x_1$ 和 $x_2$ 处的R波进行离散采样,经放大、A/D转换等处理后记录下来。

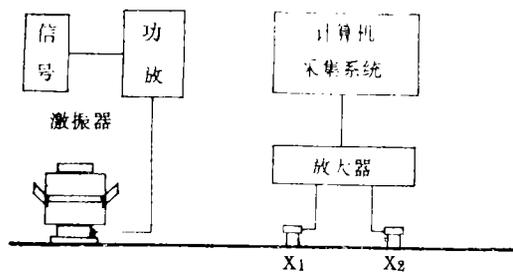


图1 瑞雷波法检测(稳态)装置

在检测时为了保证质量,经试验后技术参数规定如下:

(1) 检波距 $dx$ 选为略大于桩体直径;

(2) 震源距检波点之间的偏移距为0.8—1.2m;

(3) 激振频率为10~150Hz;

(4) 发送电流为12A(相当于40kg的激振力)。

## 2 资料处理

### 2.1 瑞雷波速的求取

对瑞雷波传播速度的测定方法通常有时间差法、互相关分析法、相位差法三种,简单介绍如下:

#### ①时间差法

设地面相邻两检波器间距为 $dx$ ( $dx < \lambda_R$ ),两检波器接收的瑞雷波的同相位时间差为 $dt$ ,则瑞雷波的传播速度由(1)式确定。显然在有干扰振动时,某一相位(零相位或峰谷相位)可能产生误差,使得 $dt$ 读数不准而影响到 $v_R$ 精度,可通过对同一频率多个同相位的时间差取平均值来减小误差。

#### ②互相关分析法

设一次采样数为 $N$ ,采样时间间隔为 $\Delta$ ,根据互相关理论, $x_1$ 、 $x_2$ 两点的互相关函数应为:

$$Y_{x_1, x_2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_1(n)x_2(n+\tau) \quad (3)$$

式中 $\tau$ 为时移量, $x_1(n)$ 为 $x_1$ 点瑞雷波振动的第 $n$ 个离散值, $x_2(n+\tau)$ 为 $x_2$ 点振动的第 $n+\tau$ 个离散值。

通过相关分析,求得第一个最大相关函数数值所对应的 $\tau$ 值后,即可计算出 $x_1$ 、 $x_2$ 两点间R波时间差 $dt = \tau \times \Delta$ ,则R波的速度 $v_R$ 为:

$$V_R = (x_2 - x_1) / dt = dx / dt$$

波长由(2)式确定。

互相关分析法利用了记录的全部资料,对整条曲线进行对比,可消除干扰,提高计

算 $v_R$ 的精度。

③相位差法

这种方法是利用付氏变换将两个检波点接收到的时域信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ ，转换为频域信号 $X_1(f)$ 、 $X_2(f)$ 。

$$X_1(f) = a_1(f) + i \times b_1(f),$$

$$X_2(f) = a_2(f) + i \times b_2(f)$$

$$\text{则 } \varphi_1 = \arctg(b_1/a_1),$$

$$\varphi_2 = \arctg(b_2/a_2)$$

所以相位差  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  相应的时差为  $dt = \Delta\varphi / (2\pi f)$ 。

有了时差 $dt$ ，计算瑞雷波的速度和波长与互相关法中的相同。

本次工作采用了时域互相关法和频域相位差法两种方法的结合，保证了 $v_R$ 的准确性。

2.2 复合地基承载力 $R_f$ 的计算

利用相位差法和互相关分析法相结合，计算出了完整的频散曲线 $v_R(f)$ 及 $\lambda(f)$ ，速度波长曲线转换为 $v_R$ - $Z$ 速度深度曲线。计算复合地基承载力之前，首先计算出单桩承载力 $R_p$ 及桩间土承载力 $R_s$ ，从 $v_R$ - $Z$ 曲线上计算 $R_p$ 、 $R_s$ ，是根据静载资料对比及前人经

验的总结，找到一个特殊函数来分段拟合 $R_p(v_R)$ 、 $R_s(v_R)$ ，即承载力 $R_p$ 、 $R_s$ 是瑞雷波速度 $v_R$ 的分段函数，以此函数计算承载力。

复合地基承载力的计算方法如下：

设平均单桩所占有土的面积 $S$ ，桩截面积为 $S_{桩}$ ，则土的面积 $S_{\pm} = S - S_{桩}$ 。

复合地基承载力 $R_f$ 为：

$$\begin{aligned} R_f &= (R_s + S_{\pm} + R_p + S_{桩}) / S \\ &= R_s(S - S_{桩}) / S + R_p + S_{桩} / S \end{aligned} \quad (4)$$

令 $S_{桩} / S = m$ ，称 $m$ 为桩土面积置换率。

$$\begin{aligned} \text{则 } R_f &= R_s(1 - m) + R_p m \\ &= (R_p - R_s)m + R_s \end{aligned} \quad (5)$$

3 试验成果

这里以45\*楼部分测试成果为例给出了瑞雷波法和静载荷试验的对比结果。

3.1 瑞雷波测试结果

①本次测试共进行了8根桩、5个桩间土和2个天然地基的瑞雷波测试，测试结果理想，基本反映了地下一定深度内地层速度的变化。为了与静载结果对比，这里只给出了8号桩、43号桩和这两根桩间土的测试结果， $v_R$ 曲线如图2所示。

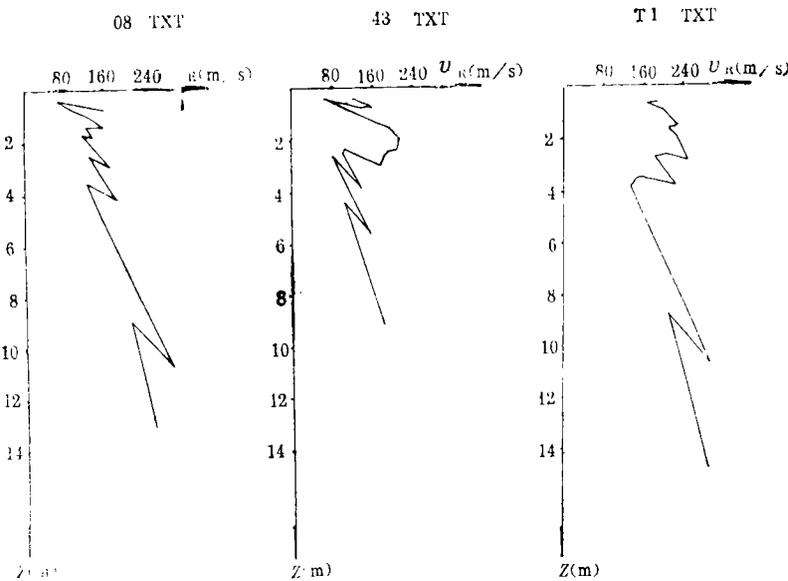


图2 瑞雷波波速——深度曲线

②由瑞雷波波速计算承载力的公式为

$$P_r = a \cdot v_R^b \quad (6)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 依土质的不同而不同(特别是地区性差异), 桩和土也不一样, 一般在测出 $v_R$ 后, 将该地区的多组静载荷实测的 $P_r$ 值代入上式, 得出 $a$ 、 $b$ 最优值, 这样的 $a$ 、 $b$ 可以作为该地区的系数代表值, 并在本地区加以运用。

由于本次测试是在静载荷试验前面进行的, 未能取到 $P_r$ 值, 故只能参考其它工程的数据, 并结合本工程筛选出较好的一组数据, 给出了 $P_r$ 值。

此外,  $v_R$ 是随深度变化的, 因此, 计算出的 $P_r$ 是 $v_R$ 的函数。考虑到挤密碴土桩的桩体以鼓出破坏为主, 因为桩体本身强度随深度而增大, 故随深度增大产生的塑性鼓出的可能性变小; 此外, 桩间土抵抗桩体鼓出的阻尼也随深度而增大, 可见最容易产生鼓出破坏的部位是在桩的上端, 径向位移比较大的深度约为两个桩径范围, 故本次测试取

的是深度在3~5m之间的 $v_R$ 平均值。

具体的系数如下:

对于桩  $a_{\text{桩}} = 4.952 \times 10^{-4}$

$b_{\text{桩}} = 2.7032$

对于土  $a_{\text{土}} = 4.5666 \times 10^{-6}$

$b_{\text{土}} = 3.5899$

$V_R$ 的单位为m/s, 计算出的承载力单位为kPa。

按(6)式可分别计算出桩和土的承载力, 测试结果见表1。

由挤密碴土桩平面图计算出的 $m$ 值为30%, 桩的直径 $D$ 取0.57m, 由(5)式可计算出复合地基承载力结果如下:

$$\begin{aligned} R_f &= R_s(1-m) + R_p \cdot m \\ &= 159 \times (1-0.3) + 380 \times 0.3 \\ &= 225.3(\text{kPa}) \end{aligned}$$

3.2 静载荷试验结果

该场地复合地基承载力设计值为200kPa, 图3是43#桩附近的59#桩上的静载荷试验结果。

表 1 桩及桩间土的承载力测试成果表

文件名	说 明	承 载 力 (kPa)	$V_R$ 的取值深度
08.TXT	8号桩	385.0	4m左右三点均值
T1.TXT	8号和43号桩间土	159.0	3.8m
43.TXT	43号桩	371.0	3.9~5.9m的平均值

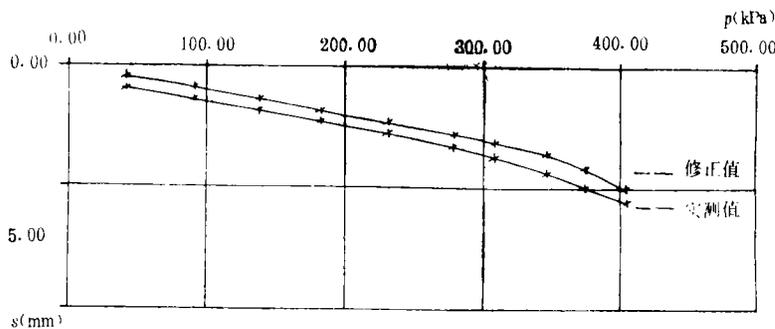


图 3 45#楼59#桩单桩复合地基静载荷试验的荷载—沉降曲线

从 $p-s$ 曲线来看, 无论用比例界限承载力, 还是用相对沉降量 $s=0.01B$  ( $B$ 为荷载板宽度) 对应的承载力取值, 复合地基承载力 $f_{sp}$ 均超过350kPa; 因为静载荷试验点是在桩径为570mm、荷载底板为820mm (见图4) 情况下得到的结果, 这与工程的桩土面积置换率相比要大, 所以进行如下计算:

取  $f_{sp}=350\text{kPa}$   $f_s=150\text{kPa}$

(由桩间土的标贯和土工资料得到)

$$m=48\%$$

代入(5)式, 求得 $f_p=563\text{kPa}$ ,

相当于单桩承载力  $R_d=143.8\text{kN}$ ,

再令 $f_p=563\text{kPa}$ ,  $f_s=150\text{kPa}$ ,  $m=30\%$ ,

代入(5)式得场地复合地基承载力,

$$f_{sp}=273\text{kPa}.$$

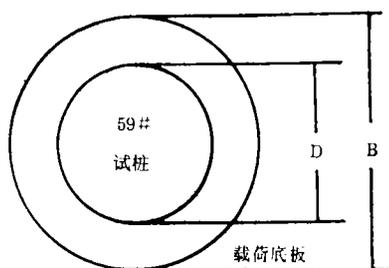


图4 试桩与荷载底板尺寸及相对位置

#### 4 结论

试验结果表明, 由瑞雷波法测试计算的复合地基承载力与静载荷试验结果相比较为接近, 都超过该场地复合地基承载力的设计值200kPa, 说明场地复合地基承载力满足设计要求。

对于这类碎石挤密桩复合地基的检验, 通常是用静载荷试验、动力触探方法, 而目前一般的基桩动测方法则不大适用, 但前者费时费工, 成本高, 因此, 瑞雷波法就成为人们所期待应用的一种有效方法。为了在北京地区得以推广应用, 今后还需要多做些与静载荷试验的对比资料, 进行深入研究, 使 $a$ 、 $b$ 系数更为确切, 从而提高计算桩与桩间土承载力的可靠性。

#### 参 考 文 献

- 1 中国航空工业勘察设计研究院, 中国地质大学(武汉)应用地球物理系. 北京通县中仓小区挤密土桩的复合地基承载力瑞雷波检测成果报告. 1994.6
- 2 曾国熙等编. 软土地基处理. 中国建筑工业出版社. 1988.8
- 3 杨成林等编. 瑞雷波勘探. 地质出版社, 1993.6

(上接第30页)

表 4

PL值(Ime'e) (kPa)	PL值(Duncan) (kPa)	A值(%)
276.36	272.44	1.4
278.32	265.58	4.5
852.60	835.94	1.9
828.10	806.54	2.6

度越小;  $A$ 值越小, 计算机确定的 $p_L$ 值代表了土的特性。一般采用10%为 $A$ 值大小的分界线。

#### 4 结语

计算机确定剪切模量值, 精度主要决定

于 $p-e$ 曲线上线性段试验数据点的多少。当试验数据少时, 落入线性段的数据点就少, 影响了线性回归分析的精度。对于极限压力值, 随外推距离的增加, 计算机确定的 $p_L$ 值与手工求出的 $p_L$ 值之差就增大。

使用计算机处理旁压试验数据, 确定土的力学参数, 应保证所有试验数据取得准确。旁压试验数据越少, 分布越均匀, 计算机确定的土力学参数就越准确。

#### 参 考 文 献

- 1 弗、巴居兰等著、卢世深译. 《旁压仪和基础工程》. 人民交通出版社出版