

## 瑞雷波在地基强夯检测中的应用

吴福良<sup>1</sup>, 耿光旭<sup>2</sup>, 仲伟周<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学管理学院, 710049, 西安; 2. 深圳地质建设工程公司)

**摘要:** 针对填海造地以及低丘整平等场地地基强夯工程中的质量检测问题, 基于瑞雷波传播的波长与测试深度呈负相关的动力学特征, 提出了瞬态瑞雷波检测法工作原理与方法。瞬态法是在激震时产生一定频率范围的瑞雷波, 该波以复频波的形式传播, 而检波器接收瞬态震动引发的地震波(以面波为主)并做信号处理, 以形成由面波信号换算出的频散曲线。与传统方法比较, 瞬态瑞雷波检测法能全面、直观和快速地检测强夯地基加固的效果, 提高强夯地基工程建设质量, 缩短质量检测周期。

**关键词:** 瑞雷波; 地基加固; 瞬态强夯检测

**中图分类号:** P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2003)04-0432-03

## Rayleigh Wave and Its Application to Testing Dynamic Compacted Ground

Wu Fuliang<sup>1</sup>, Geng Guangxu<sup>2</sup>, Zhong Weizhou<sup>1</sup>

(1. School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shenzhen Geological Construction Bureau)

**Abstract:** For the newly reclaimed land from sea and in the low-lying area, the dynamic compaction method is applied to improve the ground bearing capacity. How to evaluate the effects of the dynamic compaction work has always been a complicated engineering problem. The working principle of the transient Rayleigh wave method in prove-testing work is explained, based on the fact that the Rayleigh wave velocity is relevant to the physical features and existing status of the considered medium and on the dynamic feature that the testing depth reached by the Rayleigh wave is deeper if the propagation wavelength is longer. The transient method is to generate certain range of frequency of Rayleigh wave, when activated, and it promulgates in the form of multi-frequency wave. After receiving the earthquake waves (mostly in the form of surface waves) caused by the transient-wave generator, the wave-detector processes the signals immediately and, then, forms the frequency-scattered curves converted from the surface wave signals. When comparing with the traditional prove-testing methods, the transient Rayleigh wave method can evaluate completely, directly and quickly, not only the effects of the dynamic compaction work to ground improvement, but also contribute to the engineering quality of the ground improvement by dynamic compaction method, and shorten the time of the prove-testing work.

**Keywords:** Rayleigh wave; compacting ground; dynamic compacting test

在沿海地区的填海工程和低丘整平地基处理中, 大量采用高落距重锤动力夯实地基的强夯法。由于土质、填料、含水量、施工条件、设备、气候和施工控制等客观条件以及人为因素的影响, 强夯地基承载力分布的均匀性和加固深度的可靠性常常是此类工程建设质量的关键问题。国家和地方的地基处理规范规定, 对于一般工程应采用两种或两种以上的原位测试方法, 而对于重要工程则应增加现场大压板载荷试验的检验项目<sup>[1,2]</sup>。常用的检验方法是在地表做一些压板试验来确定地基的承载力, 并打一些钻探、标贯试验来确定其加固深度。这类方法在抽

查数量较少时易漏掉薄弱部位, 抽查数量较大时费时费钱, 特别是对那些开山填石的强夯工程, 标贯试验也显得无能为力。经过多年的建设工程实践发现, 运用瑞雷波法进行地基的强夯动态检测, 不仅能解决常用方法所不能及的问题, 而且还能提高建设工程的质量。

### 1 瑞雷波法的检测原理与方法

#### 1.1 基本原理

瑞雷波是由英国学者 Rayleigh 于 1887 年提出

的,它是一种在介质的自由界面附近传播的面波,其形成与传播直接与介质的物理特性有关.瑞雷波在二维空间传播时,其介质的质点振动图像呈逆时针椭圆形,椭圆的长轴垂直于自由界面,短轴与波的传播方向平行,长轴约为短轴的 1.5 倍;在 3 维空间也有同样的情形.瑞雷波就是靠这种形式的质点振动及质点与质点间的相互影响传播的.由波动方程推导可知,它的传播速度约为同介质内横波速度的 0.92 倍,而且能够反映介质的物理特性和存在状态 [ $V_r \approx 0.92V_s, V_s = (G/\rho)^{1/2}, G$  为剪切模量,  $\rho$  为密度]<sup>[3]</sup>.

研究证明,瑞雷波的能量主要集中在地表下的某一波长范围,而传播速度是在  $\lambda_r/2$  范围内介质振动的平均传播速度.因此,一般认为瑞雷波法的测试深度为半个波长,而波长与速度及频率之间的关系满足

$$\lambda_r = V_r / f_r$$

式中:  $V_r$  表示瑞雷波的传播速度;  $f_r$  表示频率;  $\lambda_r$  表示瑞雷波的波长.当速度不变时,频率越低,测试深度就越大<sup>[4,5]</sup>.

瑞雷波与被测地层(土体)有关,其主要特征是:①在分层介质中,瑞雷波具有频散特性;②瑞雷波的波长不同,穿透深度也不同;③瑞雷波的传播速度与介质的物理力学性质密切相关.

### 1.2 瑞雷波的测试方法

瑞雷波检测方法一般分为瞬态法和稳态法两种,这两种方法的根本区别在于震源不同.瞬态法是在激震时产生一定频率范围的瑞雷波,并以复频波的形式传播;稳态法是在激震时产生单一频率的瑞雷波,并以单一频率波的形式传播.由于瞬态法具有方便、快捷等优点,所以在强夯检测项目中采用该方法,其工作原理如图 1 所示.从图 1 可以看出,在地表面安置了一系列规则排列的检波器,用它们来接收瞬态震动引发的地震波(以面波为主),这种波经过专门仪器放大,并经信号处理后,形成频散曲线,即一系列时间差  $\Delta t_i$  或相位差  $\Delta \varphi_i$ ,经换算得出  $\lambda_i$  和  $V_r$ ,其中  $\lambda_i$  为波长,  $V_r$  为瑞雷波波速,取  $\lambda_i/2$  作为深度  $H_i$  轴,得到随深度变化的瑞雷波波速曲线 ( $V_{ri} \sim H_i$ ).

考虑到强夯后存在孔隙水压力耗散时间,我们一般在强夯结束后的 3~4 周内进行大面积的普测,确定承载力的分布和加固深度,并且用压板或其他方法进行验证,特别对一些薄弱部位要进行有针对性的检测.瑞雷波法按夯区面积进行,采用 2 m×5

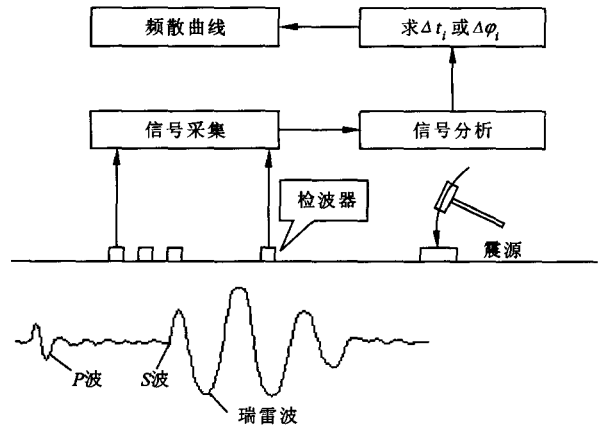


图 1 瑞雷波检测法原理图

m 或 2 m×10 m 格网测试,震源采用 30~50 kg 锅底锤,检波器自振频率为 4~28 Hz,仪器工作通道数为 6~12 道,记录长度为 200~2 000 ms.通过在深圳地区进行大量的对比试验,总结出如下经验公式<sup>[6]</sup>,即

$$N_{63.5} = 1.779 \times 10^{-3} V_r^{1.709}$$

$$f_k = 2.777 V_r^{0.796}$$

$$E_0 = 9.43 \times 10^{-5} V_r^{2.284}$$

式中:  $V_r$  表示瑞雷波波速(m/s);  $N_{63.5}$  表示标贯击数;  $f_k$  表示地基承载标准值(kPa);  $E_0$  表示地基变形模量(MPa).

通过对采样的格网化测试,可以得到如图 2 所示的每个格网节点的瑞雷波频散曲线,然后采用专门的数据处理软件,形成瑞雷波检测承载力分布图和瑞雷波检测强夯加固深度图.

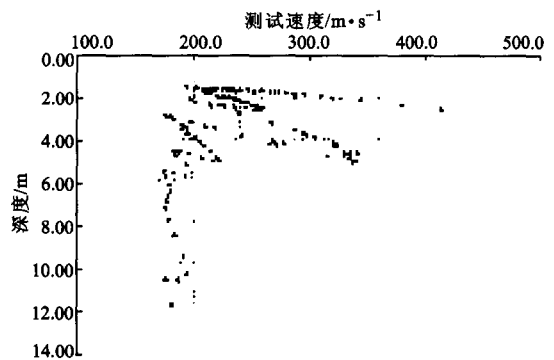


图 2 深圳某强夯工地瑞雷波频散曲线图

如果条件许可的话,还可以在强夯后的不同时间(如 7~28 d)进行瑞雷波测试,获得由于孔隙水压力耗散,地基承载力随时间增长的关系,这些参数有助于试夯检测和分区动态检测.不仅如此,还可以以此原理与方法在大范围内动态地(四维空间)掌握强

夯地基加固效果.

### 2 瑞雷波强夯检测的工程实例

近几年来,在深圳、珠海、广州、东莞等珠江三角洲地区进行了数十例强夯复合地基检测工作,主要有港口码头、核电站、飞机场、污水处理厂、工业厂房和民用建筑的强夯地基. 鉴于珠江三角洲地区的特点,大多数工程均为填土或填石整平后立刻进行强夯施工. 填土主要有素填土、杂填土、块石、冲洪积粉质粘土、粘土、强风化岩等. 填土深度范围在 1~18 m,强夯能量为 1 000~8 000 kN·m,夯点间距为 3~5 m,设计承载力为 150~250 kPa,压缩模量为 6.0~8.0 MPa,变形模量为 10~20 MPa. 强夯复合地基往往采用浅基础,因为它对地基的均匀性和有效加固深度十分敏感.

下面是深圳市某工程的检测实例. 该工程是市政府重点工程之一,场地主要由开山土石料混合填海形成,填土厚度为 3~8 m 左右,强夯能量为 2.5 MN·m,设计承载力为 150 MPa,加固深度为 3.0 m,采用 2 遍点夯、1 遍满夯施工. 由于工期紧,又遇上台风暴雨,场地条件较为复杂,因而必须掌握强夯后复合地基承载力的均匀性. 图 3 是利用瑞雷波检测地基承载力的分布图,图 4 是其加固深度分布图,图 5 是在盐田港三期试夯中,研究夯后复合地基承载力随时间变化的关系曲线. 在夯后 1~4 周后分别进行检验,并测定地基强度变化,这样可以提早判定夯后的地基质量,对不合格区域及时补救. 工程结束后一次通过验收,并利用强夯间隙合理安排工作,缩短了总工程周期.

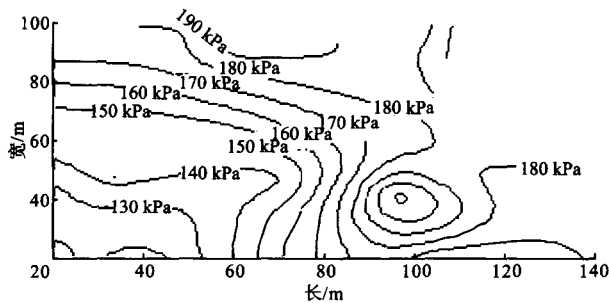


图 3 深圳某强夯工程瑞雷波检测承载力分布图

由图 3、图 4 可直观地判断不合格区域,以便于采取补救措施. 图 5 的强度增长曲线可用作动态预测.

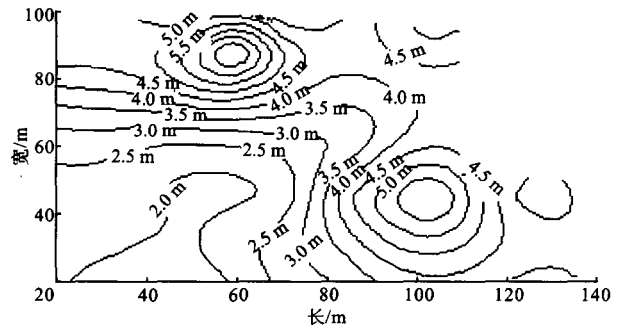


图 4 深圳某强夯工程瑞雷波检测加固深度分布图

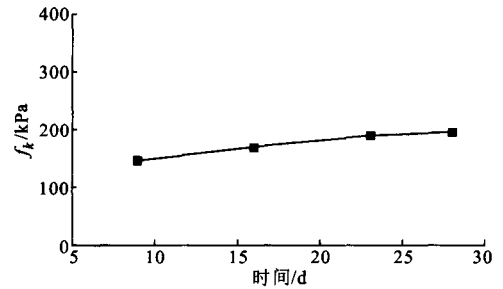


图 5 深圳盐田港三期试夯工程瑞雷波检测承载力与时间的关系曲线图

### 3 结束语

通过大量的理论研究和实践证明,瑞雷波法不仅可以检测大范围地基加固效果,而且可以提供地基承载力、加固深度等重要参数. 特别是对钻探难以进行的抛石填海地基,此法具有更独特的优越性. 所以,对于强夯建设工程的动态检测,瑞雷波法是一种非常经济有效的动态检测方法,它将在我国的工程建设地基强夯检测处理中具有广阔的应用前景.

#### 参考文献:

[1] SJG04-96,深圳地区地基处理技术规范 [S].  
 [2] DB21-907-96,建筑地基基础技术规范 [S].  
 [3] 杨成林. 瑞雷波勘探 [M]. 北京:地质出版社,1993.  
 [4] Addo K O, Robertson P K. Shear wave velocity measurement of soils using Rayleigh waves [J]. Canadian Geotech Jr, 1992, 29(3):558~568.  
 [5] Nazarian S, Stokoe K H. In-situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves [A]. 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 1999.  
 [6] 耿光旭,赵刚. 强夯地基检测中的有效方法 [A]. 地基基础检验与监测技术 [C]. 北京:中国建筑学会地基基础分会,2001.

(编辑 苗凌)