

# 深圳市抛石填海强夯地基的瑞雷波法检测

沈军明<sup>1</sup>, 林 春<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 深圳能源集团东部电厂, 广东 深圳 518120)

**摘 要:**介绍了瑞雷波勘探的基本原理和工作方法及瑞雷波勘探在抛石填海强夯地基检测中的实际应用。瑞雷波法能全面、直观和快速地检测强夯地基的加固效果, 缩短地基检测周期。

**关键词:**瑞雷波; 强夯; 加固效果; 地基检测

中图分类号: TU 441. 8

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)02-0022-03

## Rayleigh Wave Testing the Dynamic Compacted Ground Filling Stones into the Sea in Shenzhen City

SHEN Jun-ming<sup>1</sup>, LIN Chun<sup>2</sup>

(1. College of Environment And Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Shenzhen Energy Group Eastern Power Plant, Shenzhen, Guangdong 518120, China)

**Abstract:** The inspecting principle and field inspecting technique are presented with Rayleigh Wave. The assessment of strengthened effect is made for foundation with the application of Rayleigh Wave exploration. The Rayleigh Wave method can evaluate the strengthened effect of the dynamic compacted ground completely, directly and quickly in order to improve the engineering quality of the ground and shorten the testing time.

**Key words:** Rayleigh Wave; dynamic consolidation; strengthened effect; foundation inspection

随着沿海城市的发展, 用地矛盾日趋突出, 在深圳地区, 由于经济建设的需要, 大量开山片石被填到海里围海造陆, 因此, 如何对这些回填片石填筑的陆地进行质量控制和监测尤为重要。对于这些抛石填海强夯地基, 单一的岩土工程勘探可靠性低, 而钻探和动力触探尽管行之有效, 但往往要花费大量的时间和增加工程费用。而瑞雷波勘探技术无需在地层中钻孔, 测试技术简单易行, 测试信号受环境干扰较小, 与传统的静载测试相结合不仅可检测大范围的地基加固效果, 同时可提供地基承载力及加固的有效深度。本文结合深圳市某电厂强夯工程实例进一步证明瑞雷波法是一种检测块石强夯地基质量的有效方法。

### 1 瑞雷波勘探的基本原理

瑞雷波沿地面表层传播, 表层的厚度约为一个波长, 因此, 同一个波长的瑞雷波的传播特性反映了地质条件在水平方向的变化情况, 不同波长的瑞雷波的传播特性反映着不同深度的地质情况。研究证明: 瑞雷波的传播速度代表着半个波长( $\lambda_R/2$ )范围内介质震动的平均传播速度。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有如下关系:

设瑞雷波的传播速度为  $V_R$ , 频率为  $f_R$ , 则瑞雷波的波长  $\lambda_R$  为:

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f_R}$$

当速度不变时, 频率越低, 测试深度就越大。

瑞雷波有三个与被测地层有关的主要特征:

- (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。

瑞雷波测试方法一般分为瞬态法和稳态法两种。这两种方法的区别在于震源不同。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; 而稳态法是在激震时产生相对单一频率的瑞雷波, 并以单一频率波的形式传播。

### 2 工程实例

#### 2.1 工程概况

深圳市某电厂强夯工程场地由电厂平整及道路开挖产生的碎石土抛填筑陆形成, 该场地原地貌单元属大陆边缘浅海地带, 海底呈平缓斜坡状, 海底地面一般标高为 -1.80 m ~ -8.70 m。第四系覆盖层以海相沉积的  $\text{I}_1$  含淤泥粉砂、 $\text{I}_2$  粉砂和冲洪积相沉积的砾砂为主; 下伏基岩为燕山期的花岗岩。强夯工程场地现已回填至 3.0 m 标高, 主要由土、砾砂和开山块碎石组成, 块碎石成分以花岗岩为主; 另有  $\text{I}_1$ 、 $\text{I}_2$  层粉砂具液化性。为此通过强夯加固处理来提高回填土石体及下卧软弱层( $\text{I}_1$ 、 $\text{I}_2$  层粉砂)的地基强度, 并消除该层的液化性。强夯后地基土要求达到: 地基承载力特征值要求大于 150 kPa; 变形模量应大于 15 MPa; 强夯影响深度要求达到液化土层  $\text{I}_2$ (粉砂)层, 以消除建筑物区的液化隐

\* 收稿日期: 2006-04-07

作者简介: 沈军明(1980-), 男(满族), 河北遵化市人, 现为成都理工大学环境与土木工程学院硕士研究生。

患。

采用的强夯参数为:用直径为 1.6 m 的钢锤,锤重 23 t 2 遍点夯,;2 遍满夯。考虑到本工程的特点,选用瞬态瑞雷波和静载试验联合检测法先对 800 m<sup>2</sup> 试夯区进行了夯前夯后的检测,并做对比分析。

## 2.2 野外瑞雷波检测

### 2.2.1 仪器工作参数

仪器采用 SWS-1A 多功能面波仪,拾振器为 SWS-R4 面波拾振器(国产),激震器采用特制瑞雷波锤,以自由落体方式激震。采样时仪器参数为:工作道数 6 道,采样时间间隔 200 μs,通频带宽全通。

### 2.2.2 实测工作布置

测试采用瞬态瑞雷波法,夯前夯后共获得瑞雷波原始记录 110 多个。现场布设瑞雷波测线采用连续纵观测系统,间距 10 m,测点间距 2 m,偏移距 4 m,激震能量 600 N·m。一个排列结束后,震源点和所有检波器依次沿测线移动一个排列长度。夯前和夯后的测线布设方式和布设位置等参数是相同的。

## 3 资料处理与解释

### 3.1 资料处理

瞬态瑞雷波资料的主要处理解释内容为:

- (1) 对道间波形进行互相关  $\gamma = \int_{-\infty}^{+\infty} u_2(T + \tau)u_1(t)dt$ ;
- (2) 利用互相关函数求出两个检波点间各频率波形的

相位差  $\Delta\varphi(f)$ ;

(3) 利用  $V_R = 2\pi f \Delta x / \Delta\varphi$  计算出各种不同频率的瑞雷波速;

(4) 绘制瑞雷波频散曲线  $V_R \sim H$ ;

(5) 对频散曲线进行解释,提取各层瑞雷波速度  $V_R$ ,判断土层液化情况并计算出承载力特征值  $f_{sk}$ 、地基加固深度  $h$  值、推算变形模量  $E_0$ ;

(6) 用专门绘图软件绘制整个场地夯前的地基承载力分布图、变形模量分布图和试夯区夯后地基承载力、变形模量、加固深度、消除液化深度分布图。

### 3.2 成果分析

#### 3.2.1 地基承载力、变形模量和加固深度平面分布图分析

下面是利用瑞雷波检测强夯前后地基承载力和变形模量的平面分布图,以及经过强夯处理后消除液化深度和加固影响深度的平面分布图,对比分析得出:

(1) 强夯前地基承载力特征值夯前多在 110~140 kPa 之间分布,经强夯处理后检测的地基承载力特征值在 150~195 kPa 之间分布,加固效果较为明显;而在试夯区的四周地基承载力相对较低,是由强夯的边缘效应造成的,所以,在正式的强夯施工时应考虑将强夯区的范围超出至欲建建筑物位置的 1/3 加固深度处。具体分布情况见图 1、图 2。

(2) 推算变形模量强夯加固前多在 7.0~15.0 MPa 之间分布,强夯后场地变形模量在 15.0~28.0 MPa 之间,具体分布情况见图 3、图 4。

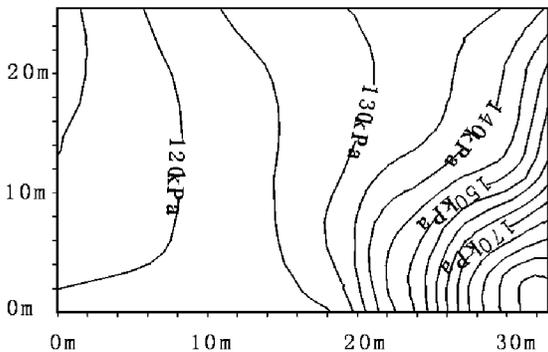


图1 夯前地基承载力平面分布图

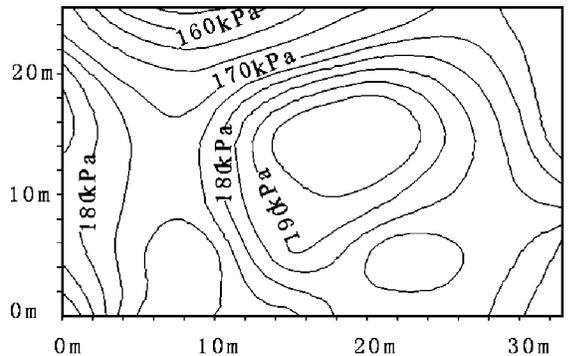


图2 夯后地基承载力平面分布图

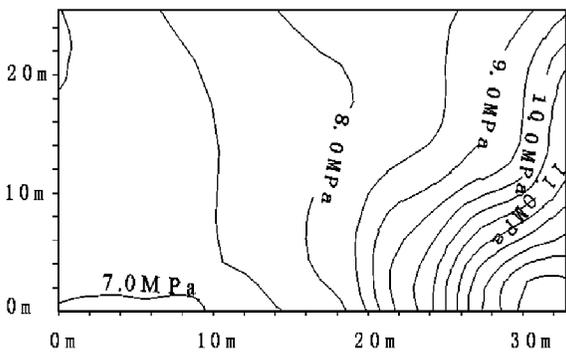


图3 夯前地基变形模量平面分布图

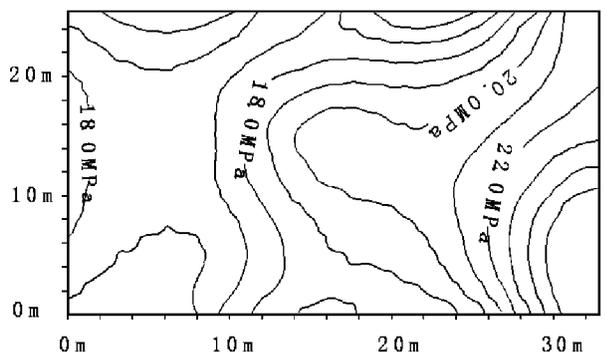


图4 夯后地基变形模量平面分布图

(3) 试夯区夯后消除液化情况,根据所测地层的瑞雷波波速,计算各层剪切波速,按 7 度地震设防烈度考虑,取临界剪切波速 180 m/s,临界瑞雷波速 165 m/s(约为剪切波速的 92%)。由此判定本场地彻底消除液化的加固深度为 7.0~11.0 m,具体分布见图 5。

(4) 试夯区夯后强夯加固影响深度在 7.0~14.0 m 之间,具体分布见图 6。

### 3.2.2 频散曲线特征分析

在层状介质或非均匀介质中,频散曲线上某些特征点的

位置反映了地层界面的位置。根据实测频散曲线的变化可以确定地下各层土的物理力学性能的变化及各层土的分界面深度,并由此判断土层加固力学性能改善效果及加固深度。夯前和夯后的瑞雷波频散曲线见图 7、图 8。分析夯前和夯后频散曲线及分层情况,强夯施工加固深度为 7 m 左右,检测点影响深度可达 7~14 m。尤其对比图 7 和图 8 可见,夯前表层土剪切波速  $V_s$  小于 150 m/s,夯后强夯区表层土剪切波速明显大于 200 m/s,甚至达到 500 m/s,且勘探深度均达到 14 m 以下。以上数据均表明,地基土物理力学性

质得到明显改善。夯前及夯后频散曲线中出现多“之”字形，在有效深度内曲线形态没有呈线性或趋于稳定，表明地基土

均匀性不好，考虑为回填块石直径较大，回填料级配差所致。

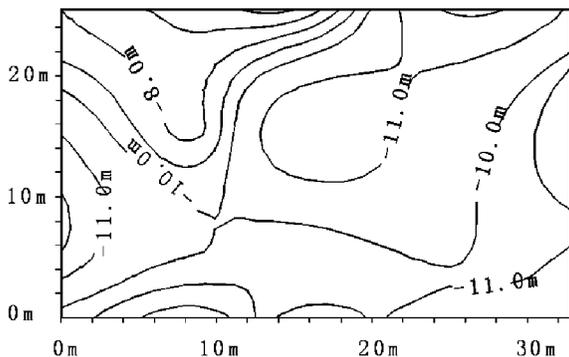


图 5 夯后消除液化深度平面分布图

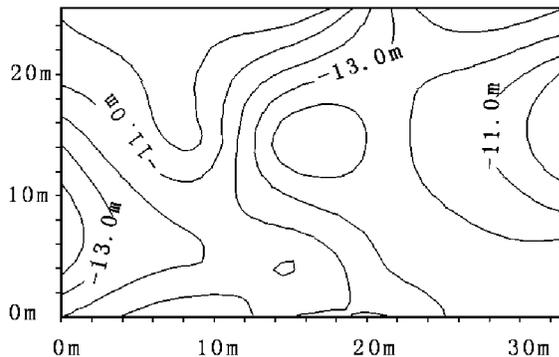


图 6 夯后地基加固影响深度平面分布图

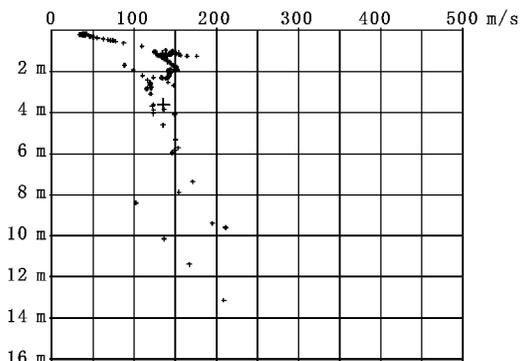


图 7 瑞雷波夯前频散曲线

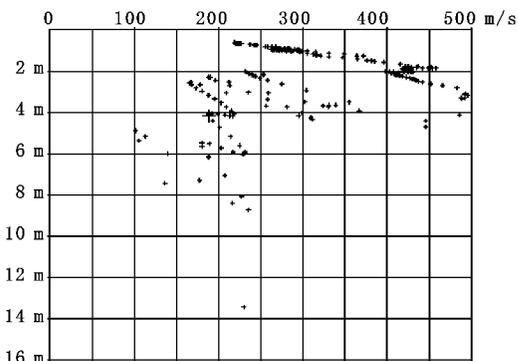


图 8 瑞雷波夯后频散曲线

3.2.3 物探-地质推断解释

根据各测点频散曲线的特征及剪切波速，结合地质-地球物理条件，将各探测点波速相近的区域化分为同一层，可获得成果断面图(见图9)。成果断面图中的分层并不是实际意义上的岩性分层，它只是一种以剪切波速为依据的分层。由成果断面图可知，在探测深度范围内，大致可分为3层。第1层平均剪切波速为355 m/s，地基承载力为431 kPa，与此处静载试验测得的443 kPa 近于吻合；第2层平均剪切波速为203 m/s，地基承载力为173 kPa；第3层平均剪切波速为150 m/s，地基承载力为115 kPa。测试结果表明：强夯区层速度和地基承载力均比非强夯区的值高，且没有出现较低的测点波速度，说明强夯的效果明显。

度，同时，对处理后场地在水平方向的均匀性做出评价，并确定加固处理所影响的深度和范围。

4 结论

(1) 试验区强夯加固深度为7 m左右，检测点影响深度达7~14 m；强夯施工后，地基承载力、变形模量获大幅提高，地基土物理力学性质得到明显改善；与测区的静载试验相对照，检测结论趋于吻合，表明瑞雷波检测块石强夯地基的加固效果是现实可行的。

(2) 瑞雷波法评价加固效果，是通过实测地基加固前后的波速差异，得到岩土体在垂向上物理力学性质的改善程

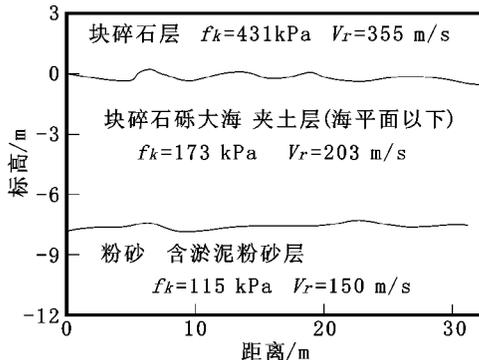


图 9 瑞雷波勘探物探-地质解释剖面

(3) 当瑞雷波勘探深度与埋设物的深度相当时，频散曲线将出现异常跳跃，通过计算可得出其埋深及分布范围，进行地下洞穴及埋设物探测。

(4) 瑞雷波法适用性广泛、全面、直观和快速，而且可提供地基承载力、加固深度等重要的参数，尤其是对钻探工艺难以进行的块碎石回填地基，更是具有明显的优势。

参考文献:

[1] JGJ79-2002, 建筑地基基础技术规范[S].  
 [2] SJG04-96, 深圳地区地基处理技术规范[S].  
 [3] 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.  
 [4] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.  
 [5] 徐至钧. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
 [6] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1988.  
 [7] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.