

瑞利波在复合地基加固效果检测中的应用

姚伯荣¹, 陈聪实², 吴天寿³

(1.宁波市公路管理局, 浙江 宁波 315104; 2.慈溪市公共项目建筑中心, 浙江 慈溪 315300;

3.中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241007)

摘要: 结合某公路复合地基加固工程, 对瑞利波测试技术在地基加固效果检测评价进行了研究. 利用测试数据, 建立了复合地基置换率和有效加固深度、复合地基承载力和复合地基剪切波速的相互关系. 结果表明: 复合地基有效加固深度和复合地基置换率是直接影响剪切波速和复合地基承载力的两个最重要的因素, 应用瑞利波测试技术能较准确地检测复合地基的加固深度. 研究成果可为瑞利波测试中的地层参数反演和地基加固效果评价提供依据和借鉴作用.

关键词: 瑞利波; 复合地基; 加固效果; 检测

中图分类号: TU455

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 04-0093-05

随着高等级公路的建设日趋势增多, 常规检测路面质量的弯沉法已不能满足要求, 需一套能快速可靠检测道路施工过程中质量的测试分析系统, 及时为工程施工服务, 确保工程质量以及检测道路质量. 瑞利波是近年来发展起来的一种新的工程物探方法, 由于瑞利波速度同剪切波速度及岩土力学参数有着密切相互关系, 因此在岩土工程勘察和复合地基检测方面得到了广泛应用^[1-6].

在地面施以适当的竖向激振力(可用大锤敲击地面或吊高重物自由下落), 地下介质中可产生纵波、横波和瑞利波, 其中瑞利波是一种沿地表传播的表面波, 传播的波阵面是一个圆柱体, 传播深度约为 1.5 个波长, 同一波长的瑞利波传播特性反映了地质体水平方向上的特性, 而不同波长的瑞利波传播特性反映了不同深度地质体的变化情况.

由于粉喷桩的刚度和模量远低于刚性桩, 其模量与桩间土的模量之比较低, 所以粉喷桩属于柔性桩, 一般的实用分析中, 视粉喷桩复合地基中桩与桩间土为变形协调, 共同承担上部荷载, 即将粉喷桩加固区范围视为复合地基. 为了判定和评价粉喷桩复合地基复合体的加固效果, 笔者结合某公路利用瑞利波检测对粉喷桩复合地基进行瑞

利波测试, 以实现检测加固效果的目的.

1 瑞利波法测试原理与应用

表面波(瑞利波)在不同的土质条件下, 其传播特性和弥散特性都不相同, 因此可利用现场所测瑞利波的弥散曲线, 通过反分析得到土层参数(如土层和混凝土的厚度和剪切波速等). 在匀质半空间中, 瑞利波波速 V_R 为一定值, $V_R = 0.9 \sim 0.93 V_s$, 即不具有弥散特性, 波在深度方向衰减快, 它的有效传播深度为 1.5λ 左右, λ 为波长.

1.1 瑞利波传播特性

半无限空间弹性介质中, 存在纵波、横波和它们相互干涉产生的表面波. 表面波以速度 V_R 沿地表传播(图 1), 此时质点运动轨迹为 1 个椭圆. 在脉冲荷载作用下, R 波以圆柱面的形式, 从振源经传感器 1 向传感器 2 往外传播. 传感器 1 和 2 接收到基本上是竖向分量的时域信号 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$, 对信号进行傅立叶变换为:

$$s(f) = \int_0^{\infty} A(t) \exp(-2\pi i f t) dt, \quad (1)$$

$$V_R = \frac{x}{\Delta t} = \frac{360 f x}{\Delta \phi}, \quad (2)$$

式中, f 为频率, 设 2 个传感器的距离为 x , 波在传播过程中的时间滞后所产生的相位差 $\Delta\phi$.

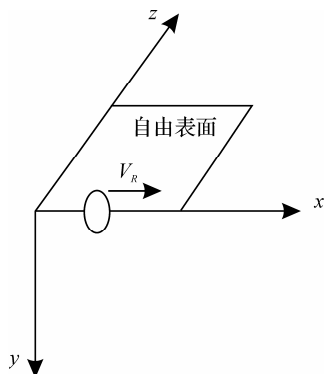


图1 弹性半空间瑞利波的传播

根据现场测试所得到的瑞利波波速, 可以反演地基的剪切波速度结构, V_R 与 V_s 的关系也可以用下式近似表示:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.14\mu}{1 + \mu} V_s, \quad (3)$$

式中, V_R 为表面波速度; μ 为泊松比; V_s 为剪切波速度.

1.2 现场测试原理

现场量测所需的主要设备是振源、接收器和记录器, 其接线布置如图2所示. 振源产生的表面波被接收器接收, 然后送至记录器, 通过计算机的处理得到实测的频散曲线.

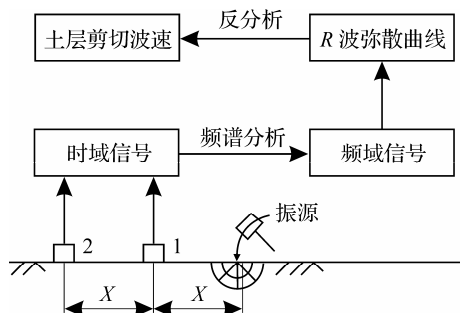


图2 瑞利波法现场测试原理

由于在距振源一定的距离上, 瑞利波能量最强, 约占传播总能量的 67%. 振源一般采用锤子或压电式换能器, 它应能在比较宽的频率范围内产生表面波. 接收器常用地震检波器或压电式加速度计. 记录器通常用双通道频谱分析仪, 可在现场对检测到的数据进行实时分析, 然后将数据送入计算机得到实测的频散曲线.

对于测试不同土体和不同深度的土层参数,

应该相应要有不同的振源信号, 即振源的频率成分直接影响所能测试土层的深度. 瑞利波在深度方向衰减很快, 有效传播深度为 1.5 倍波长, 当要测试浅层土的波速时, 应使瑞利波波长较小(相对于所要测试的土层厚度), 即振源应以高频为主, 采用小质量、大面积的锤. 相反, 测深土层的波速时, 要求瑞利波的波长较大, 振源应以低频为主, 采用大质量、小面积的锤.

2 复合地基瑞利波测试结果及分析

2.1 测试方案设计

粉喷桩均为三角形布孔, 测线布置垂直于粉喷桩施工方向(图3). 对于检波器位于桩身和桩间土的两种情况分别作了测试. 根据测试的深度要求, 现场试验排列方式为道间距 1.0~1.5 m, 偏移距 1~5 m, 24 磅落锤激发地震波, 16 Hz 检波器接受信号, 记录长度 1024 样点, 采样率 0.25~0.5 ms.

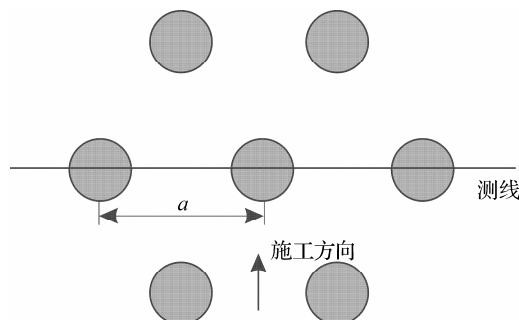


图3 粉喷桩布孔及测线布置示意图

对该公路复合地基共进行了 30 个断面的瑞利波测试. 根据原状土的剪切波速测试曲线计算了对应粉喷桩加固深度范围内的原状土和复合地基的平均波速. 运用统计方法绘制了剪切波速的正态分布曲线, 并得到了各个测试段的平均剪切波速. 将加固前后各个段的剪切波速进行整理, 得到了各个段加固后的剪切波速, 以及加固深度范围内对应的加固前剪切波速.

2.2 剪切波速与有效加固深度关系

图4为 K30+950~K31+000 测试段某一点的测试结果. 在 0~0.97 m 深度范围内, 波速为 $95.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 0.97~1.63 m 深度范围内, 波速为 $105.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 1.63~2.46 m 深度范围内, 波速为 $128.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 2.46~3.83 m 深度范围内, 波速为 $133.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 3.83~5.47 m 深度范围内, 波速为 $151.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而在

5.47~6.54 m 深度范围内, 波速减小为 $71.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 在 5.47 m 深度处, 波速有个明显的拐点, 从而说明该点处复合地基的有效加固深度为 5.47 m, 而该点处的粉喷桩设计深度为 5 m.

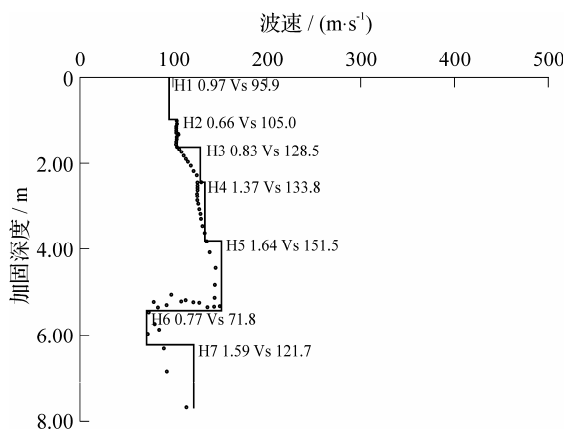


图4 瑞利波速(V_R)和剪切波速(V_s)测试结果

通过对复合地基的瑞利波测试, 可以在剪切波速曲线上找到波速由大到小的明显拐点, 从而可以辨别复合地基的有效加固深度. 软土在进行粉喷桩加固后, 强度有了明显的提高, 其剪切波速也有大幅度的提高, 而加固深度以下部分的性质和加固前相差不大.

2.3 加固深度对剪切波速的影响

为了分析方便, 对剪切波速按加固深度进行统计, 取平均值后的数据见表 1, 然后给出剪切波速随加固深度变化的关系(图 5).

表1 加固深度和平均剪切波速

加固深度/m	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
数据数/个	3	24	5	12	5
平均剪切波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	140.03	150.21	162.06	164.37	170.58

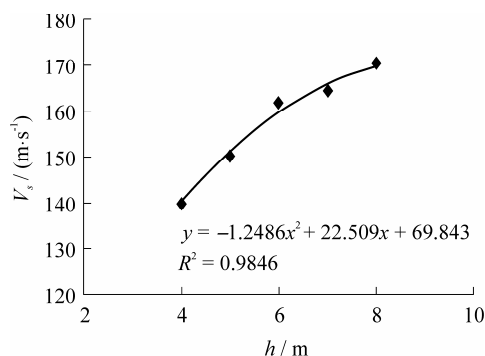


图5 复合地基有效加固深度对剪切波速的影响

在以复合地基加固深度 h 为自变量、复合地基剪切波速 V_s 为因变量, 采用二次方程回归分析建立的方程, 决定系数 $R^2 = 0.9846$ (接近于 1), 拟合度很好, 二次拟合方程为:

$$V_s = -1.2486h^2 + 22.509h + 69.843. \quad (4)$$

2.4 置换率对复合地基剪切波速的影响

根据实测的加固后的剪切波速, 将相同置换率复合地基的剪切波速进行分类, 数据见表 2.

表2 置换率和平均剪切波速的关系

置换率	0.101	0.116	0.134	0.157	0.187
数据数/个	17	4	22	3	1
波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	145.74	149.75	164.12	175.86	179.18

在以置换率 m 为自变量、复合地基剪切波速 V_s 为因变量, 采用一元线性回归分析建立的方程, 决定系数 $R^2 = 0.9238$ (接近于 1), 拟合度很好, 一元线性拟合方程为:

$$V_s = 424.37m + 103.94. \quad (5)$$

2.5 置换率对加固后前剪切波速比影响

由于地质条件不同, 有的测试段的加固前波速可能较高, 有的也可能较低, 为了更好地反映置换率对加固效果的效果, 研究置换率对加固后前剪切波速比的影响要比研究对复合地基波速的影响更合理(表 3).

表3 置换率和平均剪切加固后前波速比的关系

置换率	0.101	0.116	0.134	0.157	0.187
数据数/个	17	4	22	3	1
加固后前波速比 n	1.56	1.63	1.74	1.90	2.01

在以置换率 m 为自变量、复合地基加固后前波速比 n 为因变量, 采用二次方程回归分析建立方程, 决定系数 $R^2 = 0.9878$ (接近于 1), 拟合度很好, 二次拟合方程为:

$$nV_{s2}/V_{s1} = 5.4496m + 1.0105. \quad (6)$$

由图 6 和图 7 可以看出, 置换率直接影响着加固后剪切波速和加固后前剪切波速比, 以置换率 m 为自变量、复合地基加固后前剪切波速比为因变量比以置换率 m 为自变量、复合地基加固后剪切波速为因变量的拟合效果好得多. 因为复合地基的剪切模量与加固前原状土的性质有很大的关系, 因此, 分析置换对加固后前剪切波速比的影响比

对加固后剪切波速的影响更合理.

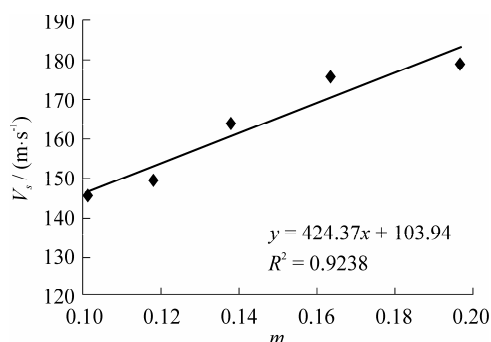


图6 置换率与复合地基剪切波速的关系

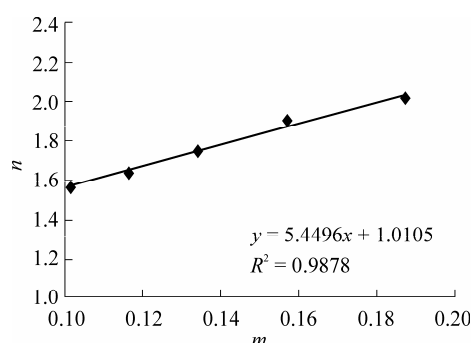


图7 置换率与复合地基加固前后剪切波速比的关系

2.6 复合地基剪切模量和剪切波速的拟合

在以置换率 m 为自变量、复合地基剪切模量 G 为因变量关系数据见表4, 采用一元线性回归分析建立的方程如图8所示, 决定系数 $R^2 = 0.9799$ (接近于1), 一元线性拟合方程为:

$$G = 3.9031 + 16.0787m. \quad (7)$$

表4 置换率和复合地基平均剪切模量

置换率	0.101	0.116	0.134	0.157	0.187
数据数/个	4	3	12	2	1
复合地基剪切模量/MPa	5.59	5.64	6.12	6.44	6.9

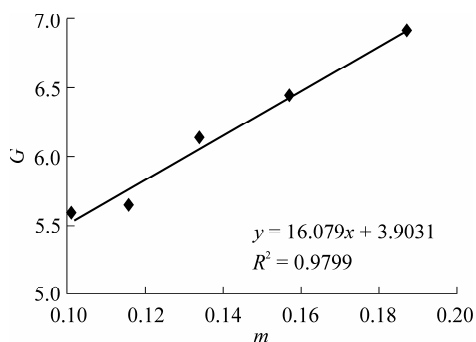


图8 置换率与复合地基剪切模量的关系

2.7 复合地基承载力和剪切波速的拟合

综合瑞利波测试得到的剪切波速和静载试验得到的复合地基承载力, 对两者的相关性进行拟合(图9). 在以复合地基剪切波速 V_s 为自变量、承载力 P 为因变量, 采用线性回归分析建立的方程, 决定系数 $R^2 = 0.9721$ (接近于1), 一元线性拟合方程为:

$$P = -41.650 + 1.6712V_s. \quad (8)$$

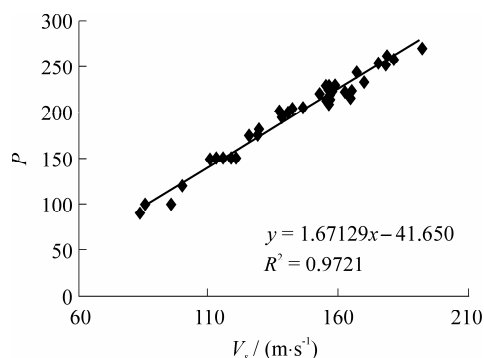


图9 复合地基承载力和剪切波速的线拟合

在以复合地基剪切波速 V_s 为自变量、承载力 P 为因变量, 采用二次回归分析建立的方程, 决定系数 $R^2 = 0.9777$ (接近于1), 二元线性拟合方程为:

$$P = -115.47 + 2.8024V_s - 0.0042V_s^2. \quad (9)$$

由图9和10可以看出, 通过线性拟合和二次拟合得出的复合地基承载力和通过静载试验得出的承载力相关均较好. 在高速公路复合地基上进行瑞利波测试获得剪切波速, 可以根据线性拟合公式求得复合地基的承载力, 大大节省了人力、物力和财力.

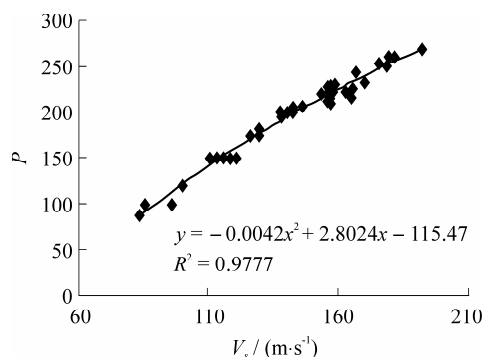


图10 复合地基承载力和剪切波速的二次拟合

通过分析复合地基置换率和复合地基剪切波速的关系说明, 本工程采用有复合地基处理模式是可行的, 处理效果达到了预期的设计目标, 尤其

是置换率越大,复合地基的剪切波速就越大,复合地基的强度就越高,复合地基的加固效果就越好。

3 结论

结合某公路软土地基加固瑞利波测试试验和实际工程验算,应用瑞利波检测技术能较准确地检测地基的加固深度。通过对大量测试数据的分析和研究表明,复合地基有效加固深度和复合地基置换率是直接影响剪切波速和地基承载力的两个最重要的因素,并得出了地基承载力和复合地基置换率、加固深度、剪切模量和波速的相互关系,证明了瑞利波检测技术能够准确地检测复合地基的加固效果。

参考文献:

- [1] 吴福良,耿光旭,仲伟周.瑞雷波在地基强夯检测中的应用[J].西安交通大学学报,2003,37(4):432-434.
- [2] 陈健,杨永波,张永.瑞雷波在块石强夯地基质量检测中的应用[J].工程地球物理学报,2005,2(5):365-368.
- [3] 孙鸣宇.瑞利波法评价地基固结度的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2008,6(3):129-131.
- [4] 张学军,许金余,赵靖. Rayleigh 波在山区高填方机场地基测试中的应用研究[J].建筑科学,2009,25(5):63-66.
- [5] 高国朋,颜可珍.软土地基加固检测评价的瑞利波法[J].水利与建筑工程学报,2010,8(8):113-116.
- [6] 戴天,厉隽.瑞利波法检验客运专线湿陷性黄土地基处理效果[J].物探与化探,2009,33(5):603-607.

Application of Rayleigh Wave Detection in Composite Foundation Reinforcement Effect

YAO Bo-rong¹, CHEN Cong-shi², WU Tian-shou³

(1.Ningbo Municipality Administration Bureau of Highway, Ningbo 315104, China; 2.Public Construction Project Center of Cixi, Cixi 315300, China; 3.CCCCSHEC Fourth Engineering Limited Company, Wuhu 241007, China)

Abstract: Combined with a highway project involving the composite foundation reinforcement, Rayleigh wave testing technology is applied in evaluation of composite foundation reinforcement effect. Based on test data, the relation are established between composite foundation replacement rate and effective reinforcement depth, composite foundation hosted force and composite foundation cut wave of mutual relationship. The test results indicate that Rayleigh waves testing technology can produce accurate detection result of composite foundation of reinforcement depth. It is also found that the composite foundation effective reinforcement depth and composite foundation replacement rate are two most important factors governing the velocity of shear wave and composite foundation bearing capacity.

Key words: Rayleigh wave; composite foundation; reinforcing effect; detection

(责任编辑 章践立)