

瞬态瑞雷面波检测碎石桩复合地基承载力研究

贺会团¹, 张献民², 赵维炳¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 中国民航学院交通工程学院, 天津 300300)

摘要: 讨论了土的变形模量同剪切波速之间的关系, 并对碎石桩的变形模量进行了研究, 通过对现场试验数据分析得到了碎石桩变形模量回归模型。在桩土应力比模量比公式的基础上, 通过建立瑞雷波和地基土压缩模量之间的关系, 建立一种利用瑞雷波确定碎石桩复合地基桩土应力比计算模型, 并对其影响因素进行了讨论。通过工程实例, 将计算值同静载试验值进行对比, 证明了其可靠性。

关键词: 复合地基; 应力比; 剪切波速; 瑞雷波; 变形模量

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)08-1039-05

作者简介: 贺会团(1980-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 主要从事地基处理和加筋土结构方面的研究。

Studies on bearing capacity of gravel-piled compound foundation detected by transient Rayleigh surface waves

HE Hui-tuan¹, ZHANG Xian-min², ZHAO Wei-bing¹

(1. Geotechnical Engineering Institute, Nanjin Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The relation between deformation modulus and velocity of shear was discussed. The deformation modulus of gravel pile was also studied, then the regression model was obtained. Based on the modulus ratio model, a new method which used Rayleigh velocity to calculate the stress ratio of compound foundation was established. The influencing factor of the stress ratio was discussed too. By comparison with the dead-load test, the reliability of the new method was verified.

Key words: compound foundation; stress ratio; shearing velocity; Rayleigh wave; deformation modulus

0 引言

桩土应力比是碎石桩复合地基的一个重要设计参数, 它反映了复合地基的工作状态, 实质上是指作用在桩体上的荷载密度与作用在桩间土体上的荷载密度之比。随着碎石桩处理软弱地基方法的广泛应用, 关于碎石桩桩土应力比 n 的研究也越来越广泛, 国内外学者结合具体的地基处理形式作了大量工作, 在各自的假定上提出了一些桩土应力比的计算公式^[1-5], 常用的有模量比公式、载荷试验 $P-S$ 曲线推算公式、基于 Rowe 的剪胀理论的公式、Baumann 公式、Preibe 公式等。由于土体和桩体的实际应力应变关系比较复杂, 至今尚无一个较为完善并被工程界普遍接受的计算模式。在实际工程应用中, 常常通过现场足尺模型试验测定桩土应力比来指导工程设计。上述方法需通过现场荷载试验确定桩土应力比 n 值, 费时费力、工期长, 且无法对整个地基的桩土应力比做一个全面的评价, 只能部分抽检取代整个工程的桩土应力比 n 值。

瑞雷面波测试技术是一种无破损、高速快捷的检测新技术, 自 Thomson、Haskell 发现了瑞雷波在层状

介质中的频散特性^[6-7], 利用瞬态瑞雷波信号测定土层波速这一课题进行了大量的研究^[8-9]。剪切波速和地基土的物理力学参数存在良好的相关性, 许多学者通过研究已经建立了不少剪切波速和地基土物理力学参数之间的关系模型^[10-11]。因此, 本文在桩土应力比的模量比公式的基础上, 探讨模型中参数与瑞雷波之间的关系, 建立利用瑞雷波速求取复合地基桩土应力比的关系模型。这样, 对于复合地基加固效果的检测将会变得快捷而有效。

1 瞬态瑞雷波勘探基本原理

利用瑞雷波法检测碎石桩复合地基承载力主要利用其两种特性: ①在分层介质中瑞雷波速度的频散特性; ②瑞雷波传播速度与介质物理力学性质的密切相关性。前者可以根据实测频散曲线划分层位, 并计算各层的波速值; 后者根据压缩模量、承载力等也与土层物理力学参数密切相关的特点建立与它的关系模

型。

对于均匀的弹性半空间层状介质,其表面受到瞬态冲击作用时,将产生瞬态振动,振动组分中包括纵波、横波和瑞雷波。在一次冲击产生的波能中,瑞雷波占 67%,而纵波和横波只占有少量的能量。

理论研究表明,在瑞雷波传播过程中,能量大部分集中在 λ_R 深度范围内。改变激振力的频率 f ,也就改变了瑞雷波的波长和穿透深度。这样,简谐激振力的频率由高往低变化,分别测试出各个频率的瑞雷波传播速度,就实现了由浅向深的探测。

瑞雷波的传播速度与剪切波速 V_s 有近似关系^[12]:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} V_s, \quad (1)$$

式中, μ 为地层的泊松比。第四系地层的泊松比为 0.4~0.49,因此对于常用的地基土体,瑞雷波速和剪切波速近似相等,误差只有 5% 左右。

2 桩土应力比计算模型研究

2.1 土的变形模量和瑞雷波速关系模型

变形模量 E_s 、标准贯入击数 N 和剪切波速 V_s 均反映了土体的软硬程度,他们之间具有良好的相关性。通过研究现有 $E_s - N$ 、 $N - V_s$ 之间的关系模型,发现 E_s 和 V_s 可建立对数关系。即: $E_s = A \cdot \log V_s + B$ 。

本文利用文献[13]中提到的 3 种砂性土计算模型对现场实测的 158 个数据分别进行计算,并对测试数据进行回归分析,得到 E_s 和 V_R 回归曲线,见图 1。本文计算基于回归分析得到土压缩模量 E_s 和瑞雷波速 V_R 之间的关系模型:

$$E_s = 11.435 \ln V_R - 49.541. \quad (2)$$

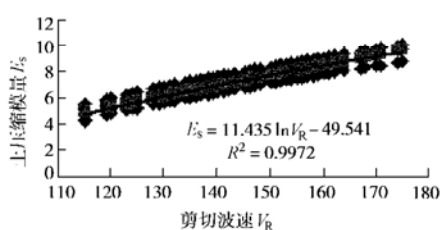


图 1 V_s 和 V_R 回归曲线

Fig. 1 Regression curve of E_s and V_R

2.2 碎石桩变形模量研究

碎石桩变形模量是桩土应力比计算过程中一个重要的参数,由模量比公式知道,碎石桩和桩间土的变形模量之比是影响桩土应力比取值的一个重要因素。由于碎石桩的复杂性,人们对碎石桩变形模量还没有进行系统的研究。本文根据 3 个场地 18 根碎石桩的单桩承载力静载荷试验,绘出 18 根碎石桩变形模量统计图,见图 2。

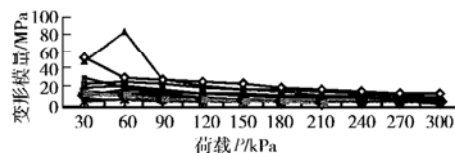


图 2 碎石桩变形模量统计图

Fig. 2 Statistics of deformation modulus for gravel pile

碎石桩的变形模量可按式进行计算^[12-13]:

$$E_p = \frac{\sqrt{\pi(1-\mu_p^2)} \cdot P}{2S \cdot b}, \quad (3)$$

式中, μ_p 为碎石桩泊松比, P 为荷载值 (kPa), S 为对应于 P 的沉降量 (mm), b 为荷载板直径或宽度 (cm)。

对图 2 分析可知,除两根桩体由于受到施工质量、地基土强度突变等因素影响而存在变异外,其它各桩变形模量随荷载的变化趋势大体相同。在荷载加载初期,碎石桩发生弹性变形,在弹性荷载作用下,碎石桩体内部空隙缩小,强度增大,变形模量增大;随着荷载的进一步施加,部分碎石在外力作用下向桩周土扩散,使得桩体内部结构发生松动,土体和碎石融合在一起,碎石桩的变形模量有所下降;随着荷载的持续施加,碎石和土的相互作用进入稳定工作状态,表现在碎石桩的变形模量也基本保持稳定,这也恰好和碎石桩的变形机理相吻合。

对全部 18 根碎石桩变形模量随荷载变化情况进行回归分析,发现用指数关系进行拟合具有良好的相关系数。碎石桩变形模量回归曲线,如图 3。

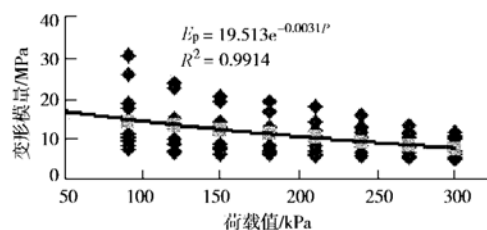


图 3 碎石桩变形模量回归曲线

Fig. 3 Regression curve of deformation modulus for gravel pile

碎石桩变形模量受到土质、桩体材料、级配、施工等众多因素的影响。提出方便、合理的碎石桩变形模量计算模型也是今后研究的一个重要课题。本文通过对河北廊坊 3 个试验场地 18 根碎石桩变形模量的研究,考虑区域性差异,并同现场数据多次对比试算,给出碎石桩变形模量参考值 16 MPa。其准确性和通用性还需要进一步深入地研究和现场试验数据的检验。其他地区在没有现场静载试验资料的情况下可做参考。当然,目前静载试验仍是确定碎石桩变形模量的最可靠方法。

2.3 理论分析及模型建立

模量比公式是最简单的桩土应力比计算公式, 他假定在刚性基础下, 桩体和桩间土的竖向应变相等, 即 $\varepsilon_p = \varepsilon_s$ 。于是, 桩体上竖向 $\sigma_p = E_p \varepsilon_p$, 桩间土上竖向应力 $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$, 桩土应力比 n 的表达式为

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} = \frac{E_p \varepsilon_p}{E_s \varepsilon_s} = \frac{E_p}{E_s} \quad (4)$$

上述假定与实际情况有较大的差别, 用来估算桩土应力比 n 值比较粗糙。

在分析碎石桩复合地基共同工作的理论研究中, 本文认为: ①复合地基中碎石桩体承载过程中竖向压密、径向膨胀, 在两个方向上应力—应变性质不同, 因此碎石桩的径向变形模量与纵向不同; ②桩周土为弹塑性体, 其受力情况在弹性区 $p = ky$, 而塑性区为库仑土压力。桩体变形可等效为竖向压密和径向膨胀的合成。根据魏西克原孔扩张理论^[5,15], 在碎石桩向桩间土的扩张过程中, 土体先发生弹性变形; 随着径向压力的增大, 桩周土开始进入塑性屈服阶段, 复合地基进入极限状态。

综合竖向压密和径向鼓出阶段, 得到其总竖向应力和径向应力:

$$\begin{cases} \sigma_{zp} = \sigma_{zpa} - \sigma_{zpb} = \frac{1 - \mu_p}{(1 + \mu_p)(1 - 2\mu_p)} E_{pv} \varepsilon_{zp} - 2\mu_p E_{ph} \varepsilon_{rp} \\ \sigma_{rp} = \sigma_{rpa} - \sigma_{rpb} = \frac{\mu_p}{(1 + \mu_p)(1 - 2\mu_p)} E_{pv} \varepsilon_{zp} - E_{ph} \varepsilon_{rp} \end{cases} \quad (5)$$

引入 $p-y$ 曲线法:

$$\sigma_{rp} = K(R_u - R_i) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma_{zp} = \sigma_{zpa} + \sigma_{zpb} = E_{pv} \varepsilon_{zp} \cdot \frac{1 - \mu_p}{(1 + \mu_p)(1 - 2\mu_p)} - \frac{2\mu_p^2}{(1 + \mu_p)(1 - 2\mu_p)} \cdot \frac{E_{ph}}{E_{ph} + KR_i} \\ \sigma_{rp} = \sigma_{rpa} - \sigma_{rpb} = K \cdot \frac{\sigma_{rpa} R_i}{E_{ph} + KR_i} \end{cases} \quad (7)$$

根据魏西克原孔扩张课题, 在碎石桩向桩间土的扩张过程中, 土体先发生弹性变形, 随着径向压力的增大, 桩周土开始进入塑性屈服阶段, 复合地基进入极限状态。

式(7)中求得 σ_{rp} 为桩土边界应力, 由魏西克弹性扩张理论计算桩间土应力分布得到:

$$\sigma_{rs} = K \cdot \frac{\sigma_{rpa} R_i}{E_{ph} + KR_i} \cdot \frac{R_u^2}{r^2} \quad (8)$$

$$R = R_i / \sqrt{m(4 - 3m)} \quad (9)$$

式中, r 为土体微元到桩中心的距离, R 为单根桩加固面积的折算半径, m 为复合地基桩土面积置换率。

对式(6)积分可以得到桩间土受到的平均挤压应

力为

$$\sigma_{rs} = \frac{\int_{R_u}^R \frac{K \cdot R_i \cdot \sigma_{rpa}}{E_{ph} + KR_i} \cdot \frac{R_u^2}{r^2} dr}{R - R_u} = \frac{K \cdot R_i \cdot \sigma_{rpa}}{E_{ph} + KR_i} \cdot \frac{R_u}{R} \quad (10)$$

土的竖向应力为

$$\sigma_{zs} = E_s \cdot \varepsilon_{zs} + 2E_{pv} \cdot \varepsilon_{zp} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_u}{R} \cdot \frac{\mu_p}{1 - \mu_p - 2\mu_p^2} \cdot \frac{K \cdot R_i}{E_{ph} + KR_i} \quad (11)$$

桩土应力比 n 的计算式为

$$n = \sigma_{zp} / \sigma_{zs} \quad (12)$$

$$\text{令} \quad \varepsilon_{rp} = \eta \varepsilon_{rs} \quad (13)$$

将式(11)、(13)和(7)中的第2式代入式(12)中得到:

$$n = \frac{\eta \frac{E_{pv}}{E_s} \cdot (1 - \mu_p - 2\mu_p^2) E_{ph} + (1 - \mu_p) K R_i}{(1 + \mu_p)(1 - 2\mu_p)(E_{ph} + K R_i) + 2\mu_p \mu_s \left(\frac{\eta E_{pv}}{E_s} \right) \left(\frac{R_u}{R} \right) K R_i} \quad (14)$$

已知 $K \cdot R_i = E_{ph}$, 并令 $R_u/R \approx R_i/R$, 代入式(13)

中得到桩土应力比的简化计算式:

$$n = \eta \frac{1 - \mu_p - \mu_p^2}{1 - \mu_p - 2\mu_p^2 + \mu_p \mu_s (E_{pv}/E_s) \sqrt{m/(4 - 3m)}} \cdot \frac{E_{pv}}{E_s} \quad (15)$$

式中, η 为桩土应变比, 它反应了随时装和桩间土的压缩变形关系, 一般情况下 $\eta \leq 1$ 。当 $\eta = 1$ 时, 将式(2)和本文 2.2 节讨论的碎石桩变形模量参考值代入式(14)得瑞雷波速确定桩土应力比计算模型:

$$n = \frac{1 - \mu_p - \mu_p^2}{1 - \mu_p - 2\mu_p^2 + \mu_p \mu_s [16.0 / (11.435 \ln V_R - 49.54)]} \cdot \frac{1}{\sqrt{m/(4 - 3m)}} \cdot \frac{16.0}{11.435 \ln V_R - 49.54} \quad (16)$$

由图 4~6 可看出:

(1) 桩土应力比随复合地基置换率的增大而减小。

(2) 桩土应力比主要受到桩土模量比的影响, 并随其增大而增大, 计算表明, n 值与模量比较接近, 当 $\mu_s \neq 0.5$ 时, 若 $E_p/E_s = 0.3$, 两者的比值为 1.11~0.97; 若 $E_p/E_s = 6.0$, 比值为 1.0~0.83。

(3) 桩土应力比 n 对 μ_p 和 μ_s 的变化不敏感, 具有较大的稳定性, 因此在工程实践中使用上述公式进行计算桩土应力比时, 桩土参数可以按照常用值和经验值取用。碎石桩的 μ_p , 可取 0.25; 地基土的 μ_s , 排水条件下, 可塑性粘土可取 0.35; 软塑土以及流塑性粘土可取 0.40; 粉土类土可取 0.25。

(4) 在施工工艺得到满足的情况下, 碎石桩的变形模量变化不大, 对桩土应力比的影响不大, 因此, 在桩土模量比对桩土应力比 n 的取值的影响中, 主要

是桩间土的变形模量 E_s ，即反映为桩间土瑞雷波速变化产生的影响。

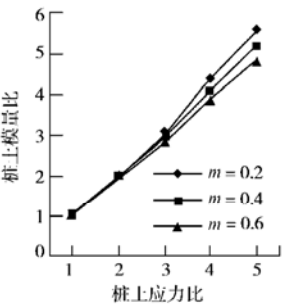


图 4 n 随模量比变化

Fig. 4 Variation of n with modulus ratio

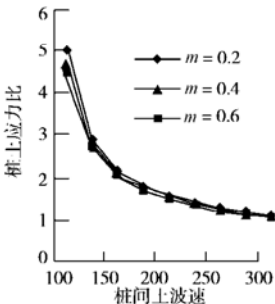


图 5 n 随桩间土波速变化

Fig. 5 Variation of n change with velocity of wave

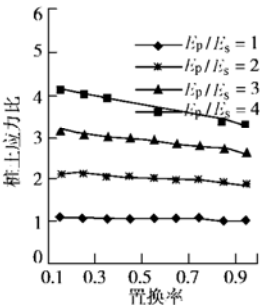


图 6 n 随置换率变化

Fig. 6 Variation of n with replacement ratio

3 工程算例

为进一步验证公式的可靠性，我们对某办公楼的碎石桩复合地基场地同时进行了静荷载试验和瑞雷波法测试，并将测试结果进行了对比分析。

由测得的土体瑞雷波速 V_R ，可以得到天然地基的承载力^[14]：

$$f_s = 2.777V_R^{0.796} \quad (17)$$

根据复合地基承载力应按置换率和应力集中比来计算的原理，即依据复合地基的应力按材料刚度大小进行应力重新分布的理论，复合地基的容许承载力由下式给出：

$$f_c = (1 + (n - 1)m)f_s \quad (18)$$

式中， f_c 为复合地基容许承载力 (kPa)， f_s 为桩间土

容许承载力 (kPa)。

场地设计桩径为 0.42 m，有效桩长 7.0 m，桩土面积置换率为 0.132，复合地基承载力设计值 150 kPa。地质条件如下。①层杂填土：黄褐色，上部 0.3~0.4 m 含大量石子，下部以黄色粉土为主，层厚 0.6~0.8 m；②层粘土：黄褐色，可塑，见锈染，场区普遍分布，层厚 1.4~1.9 m， $f_k = 100$ kPa；③层粉土：黄褐色，很湿，稍密，含云母，土质均匀，层厚 0.5~1.0 m， $f_k = 100$ kPa；④层粉细砂：灰色，中密，土质不均，局部为粉土，场区内普遍分布，层厚 0.6~1.4 m， $f_k = 160$ kPa；⑤层粉质粘土：灰色，软塑，土质不均，局部为粘土，场区普遍分布，层厚 0.5~1.3 m， $f_k = 100$ kPa；⑥层粉土：灰色，湿，中密，夹多层粉质粘土薄层，场区普遍分布，层厚 3.3~7 m， $f_k = 150$ kPa；⑦层细砂：黄色，饱和，密实，土质均匀，场区普遍分布，层厚 1.2~2.2 m， $f_k = 200$ kPa；⑧层粉土：黄色，稍湿，含云母，土质均匀，该层未穿透， $f_k = 170$ kPa。

静荷载试验共进行单桩复合地基静荷载试验 6 个点，按相对沉降法取值 ($s/b = 0.017$)，复合地基承载力平均值为 173 kPa，极差为平均值的 29%，由此确定复合地基承载力标准值为 173 kPa。

场地共布设瑞雷波法测试点 62 个，各测试点瑞雷波速在 115~157 m/s 之间，平均波速为 138.5 m/s。图 7 为瞬态面波原始波形记录，图 8 为典型频散曲线。

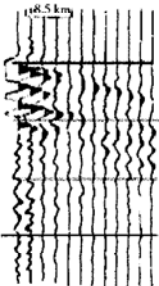


图 7 瞬态瑞雷波原始波形记录图

Fig.7 Original form of transient Rayleigh waves

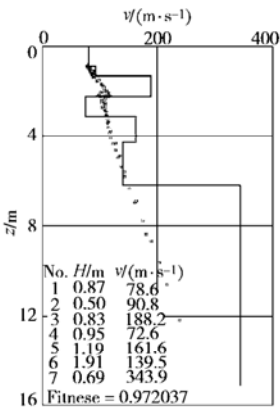


图 8 典型频散曲线图

Fig. 8 Typical dispersion curve

通过6个点进行静载试验得到的复合地基承载力值在170~177 kPa,平均值为173 kPa。经运用本文提出的碎石桩承载力计算公式计算,复合地基承载力基本值在165.3~179.9 kPa之间,复合地基承载力标准值为171.1 kPa,标准差为3.5 kPa。图9为计算值与静载试验值对比。图中横坐标与纵坐标交点173 MPa为通过现场静载试验测得的复合地基承载力值,本图表明瑞雷波测试值在静载试验值附近的波动情况。由图可见,计算值在静载试验值173 kPa之间小幅度波动,远离静载试验值最大距离为8 kPa。

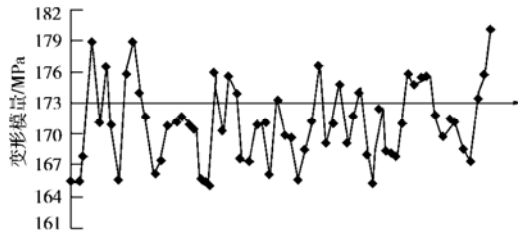


图9 承载力计算值与静载试验值比较

Fig. 9 Comparison between the calculated values and dead load test values

4 结 论

(1) 瞬态瑞雷波测试技术是一种新兴的勘探技术,瑞雷波速与土的压缩模量、碎石桩复合地基桩土应力比和承载力之间具有良好的相关关系。

(2) 利用3种 $E_s - V_R$ 计算模型,对168个现场实测数据进行计算,并进行二次回归处理,得到新的有效的 $E_s - V_R$ 计算模型。

(3) 通过测试得到桩土应力比的各种影响因素分析,知道碎石桩复合地基桩土应力比主要影响因素是土的变形模量,即桩间土的波速值。根据对18根碎石桩变形模量的研究分析,得到碎石桩变形模量的回归曲线,给出碎石桩变形模量的推荐值。

(4) 通过引入新的计算参数,在模量比公式的基础上建立了新的桩土应力比计算公式——瑞雷波速求解桩土应力比的方法。与静载荷试验结果对比证明,应用瞬态瑞雷波测试技术检测复合地基承载力可以获得可靠的精度,并且可以对整个场地进行快捷、全面的承载力评价,从而可以弥补静载荷试验只能进行局部检验、少量抽测的不足。

参考文献:

[1] 韩杰,叶书麟.碎石桩复合地基有限元分析[J].岩土工程学报,1982,14(增):13-19.(HAN Jie, YE Shu-lin. Finite element analysis of gravel-piled compound foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 14 (Supplement): 13-19.)

[2] 郭蔚东,钱鸿缙.碎石桩地基的承载力[J].西安冶金建筑科学

院学报,1990(6):32-35.(GUO Wei-dong, QIAN Hong-jin. Bearing capacity of gravel-piled foundation [J]. Journal of Xian Metallurgical Construction Academy, 1990(6):32-35.)

[3] 陈振健,盛崇文.满堂加固碎石桩地基承载力[J].水利水运科学,1987(2):13-16.(CHEN Zhen-jian, SHENG Chong-wen. Bearing capacity of Full reinforced gravel-piled foundation [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1987(2):13-16.)

[4] 王树强.确定桩土应力比 n 值的探讨[J].西南交通大学学报,1993(3):40-45.(WANG Shu-qiang. Discuss about the determine of pile soil stress ratio n [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993(3):40-45.)

[5] 赵明,赵明华,陈昌富.确定碎石桩复合地基桩土应力比的一种新方法[J].湖南大学学报.2002(4):112-116.(ZHAO Ming, ZHAO Ming-hua, CHEN Chang-fu. New pile soil stress ratio calculation method in rushed stone pile composite foundation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2002(4):112-116.)

[6] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium [J]. Appl Phys, 1950(21):89-93.

[7] HASKELL N A. The dispersion of surface waves on multi-layered media[J]. Bull Seism Soc Am, 1953(43):17-34.

[8] SOHEIL Nazarian, MILIND R D. Automated surface wave method: the field testing[J]. Journal of Geotechnique Engineering, 1993, 109(7):1094-1112.

[9] DEREN Yuan, SOHEIL Nazarian. Automated surface wave method: inversion technique[J]. Journal of Geotechnique Engineering, 1993, 109(7):1112-1127.

[10] 张宝山.地基土的弹性波速度[J].工程勘察.1984(3):75-76.(ZHANG Bao-shan. Elastic wave velocity in foundation soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1984(3):75-76.)

[11] 缪林昌.瑞雷波法对液化地基的评价研究[J].建筑结构,2001(10):44-47.(MIU Lin-chang. Evaluation research of liquefied foundation by rayleigh wave [J]. Building Structure, 2001(10):44-47.)

[12] 吴世明.土动力学原理[M].杭州:浙江大学出版社,1984.(WU Shi-ming. Territories dynamics theory [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press. 1984.)

[13] 杨成林.瑞雷波勘探[M].北京:地质出版社,1993.(YANG Cheng-lin. Rayleigh wave exploration [M]. Beijing: Geological Press.1993.)

[14] 耿光旭,赵刚.强夯地基检测的有效方法——瑞雷波法[J].勘察科学技术,2001(5):57-60.(GENG Guang-xu, ZHAO Gang. Effective method for detecting the foundation by dynamic consolidation——Rayleigh wave method [J]. Site Investigation Science and Technology, 2001(5):57-60.)