

瑞利面波法用于软土地基勘察的试验研究

曹圣华¹ 杨晓东² 朱正坤² 雷 霄³

(1.江苏省苏通大桥建设指挥部,江苏 南通 226009;2.江苏省交通规划设计院,江苏 南京 210001;
3.交通部路桥工程二局,陕西 西安 710001)

摘要 介绍面波法检测原理及其在软土地基和软弱夹层测定中的应用.分析表明,根据面波实测波速值可以区分软土或非软土地层,若层间存在较明显的波速度差,而且土层厚度较大时,可以结合一定数量的钻孔,根据波速变化进行分层,获得比较连续的地层剖面,从而减少钻探工作量.

关键词 瑞利面波法;软土地基;勘察

中图分类号 :P64 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2003)04-0419-05

在高速公路路基、机场跑道、防洪堤坝、高层建筑等勘察中,软土地层属不良地质体,需重点勘察并加固处理.目前用于软土地基勘察的主要方法有钻探取芯、静力触探等方法.瑞利面波法是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新的工程物探勘察手段,它可以进行浅部地层的波速分层.由于该方法施工方便、成本低,可以做面积性或网格状检测,故将其用于软土地基的勘察有广阔的市场前景.但瑞利面波法用于软土地基勘察尚处于初始阶段,尚需在提高理论水平和推广使用方面下功夫.

1 面波法检测原理

1.1 面波速度 V_R 和横波速度 V_S 的关系

由介质弹性模量和泊松比关系,可得出横波与纵波的速度比

$$\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \tag{1}$$

式中 ν 为泊松比.将式(1)代入含有面波速度的瑞利方程,可得到

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 - \frac{2(2-\nu)}{1-\nu}\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - \frac{8}{1-\nu} = 0 \tag{2}$$

其中 V_R 为瑞利面波速度.对式(2)进行求解,可得出面波速度与横波波速的关系式为

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_S \tag{3}$$

一般软土层的泊松比 $\nu = 0.45 \sim 0.49$,则

$$V_R = 0.95 V_S$$

即面波速度 V_R 可近似代替横波速度 V_S .

1.2 瑞利面波波速度 V_S 与复合地基承载力经验公式

瑞利面波速度 V_R 与复合地基承载力经验公式如下:

$$f_k = k_1 \times 10^{-2} V_R^{1.636}$$

其中 k_1 为修正系数,受不同地区岩土力学性质的影响.对本研究区土层一般取 $k_1 = 3.210$. f_k 的单位为 kPa.

1.3 面波速度 V_R 的测定

瑞利面波法目前有稳态法和瞬态法两种测试方法,其中瞬态法因设备轻便、施工方法简单而获得更广泛的应用.根据不同的仪器设备,该方法有两种不同观测方式.一种是一点激发,两道接收,分析两道所接收到

的面波信号 经处理获该测点的频散曲线图 ;另一种方式是多道接收(12 道或 24 道) 组成一个排列 ,在排列一侧 ,选取一定偏移距进行激发(锤敲或落锤) ,以后经资料处理获该排列中心点位置的频散曲线 .多道接收方式与两道接收方式相比具有一定的优越性 ,故为最常用的方法 .

对于软土地基测试 ,应强调如下两点 :

a. 为获得真实可靠的频散曲线 ,关键需控制激发频率 :例如 ,要求深度 Z 达 20 m ,波速 $V_R = 120$ m/s 左右 ,此时应激发的最低频率为

$$f = \frac{V_R}{2Z} = \frac{120}{2 \times 20} = 3(\text{Hz})$$

故必须激发出下限为 3 Hz 低频信号 .若保证分辨率 $\Delta H = 0.5$ m ,则需宽频带接收(如选带宽 2 ~ 100 Hz) .震源可采用 28 磅大铁锤敲击 30 cm × 30 cm 硬铝质垫板产生面波 .另外 ,用大铁锤直接敲击厚度为 20 cm 的砂袋 ,可以激发低频成分较丰富的面波 .

b. 为了获取薄夹层软土波速值 ,检波距不宜过大 ,一般为 0.5 ~ 1 m ,12 道 4 Hz 检波器接收 ,偏移距视薄夹层埋深根据试验确定 .

2 软土地基及软弱夹层测定

瑞利面波法由于施工方便、效率高 ,可做多测点剖面性测定 ,因此可配合钻探施工 ,减少钻孔数量 ,提高进度 .例如在两钻孔间布置多个面波测点 ,追踪孔间软土层的深度及厚度变化 .特别是工程的预可或工可阶段 ,钻孔数量不多而孔距较大时 ,可用瑞利面波法加以补充 .

软土夹层的特征是波速偏低 ,一般为 $V_R = 100 \sim 130$ m/s ,较一般粘土($V_R = 150 \sim 250$ m/s)或砂土($V_R = 200 \sim 280$ m/s)的波速低 30% 以上 ,在面波频散曲线中会出现“ 左拐 ”的扭曲现象 ,扭曲程度视软弱层厚度及波速而定 .图 1 是一幅软地层频散曲线和钻孔对照图 ,其中 $V_R(Z)$ 是频散曲线 , V_{Rm} 为层速度 , $H_1 \sim H_{12}$ 为层厚 2.82 m 以浅为暗灰色粘土 ,下面出现厚度 2.5 m 腐殖土和厚度约 6 m 的有机质土 ,在 3 ~ 10 m 处引起频散曲线向左扭曲 .由图 1 看出 ,软土层面波速度仅 101 ~ 128 m/s ,其对应的标贯击数 $N_{63.5}$ 为 3 ~ 5 击 .

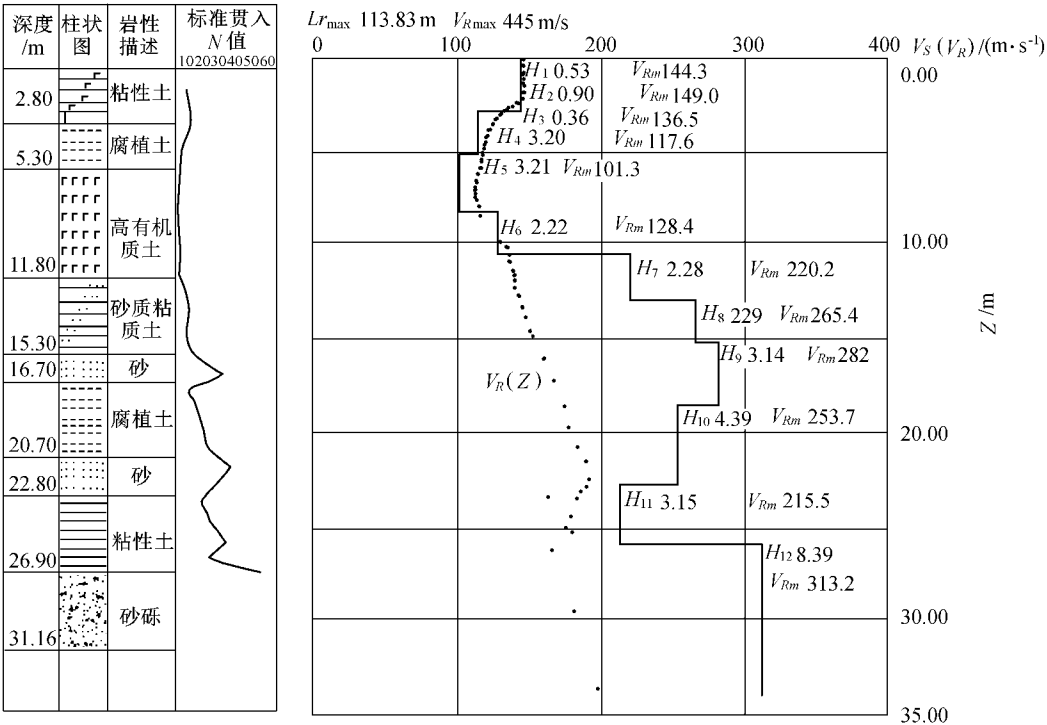


图 1 典型软土夹层面波频散曲线与钻孔对照

Fig.1 Dispersion curves of typical soft soil surface wave and hole boring

3 盐城至南通高速公路的勘察试验

盐城至南通高速公路主要位于滨海平原区,沿线浅地层多分布有软土,一般为淤泥质亚粘土,局部夹粉砂。本次试验仪器采用 SWS—I 型面波仪,12 道接收,检波点距 1 m,4 Hz 低频检波器,24 磅大锤敲击震源。每个测点均做了多种方法观测,偏移距选 6 m、10 m 和 15 m 不等,敲击垫板分别用铁板、硬木板,或直接敲击路面,记录长度分 512 ms 和 1 024 ms 两档,这样,每个测点平均获数张面波记录(文件),供解释时选择对比。

资料处理按 FKSWA 面波处理系统进行,获面波频散曲线图。对照附近钻孔资料进行波速分层并测定对应地层的波速值,统计同一地层的波速变化范围,根据波速值进行软土地层特征分析。本次试验地点为盐城至南通高速公路 K10+000~K18+700 段(见图 2)。



图 2 试验段位置

Fig.2 Location of test sections

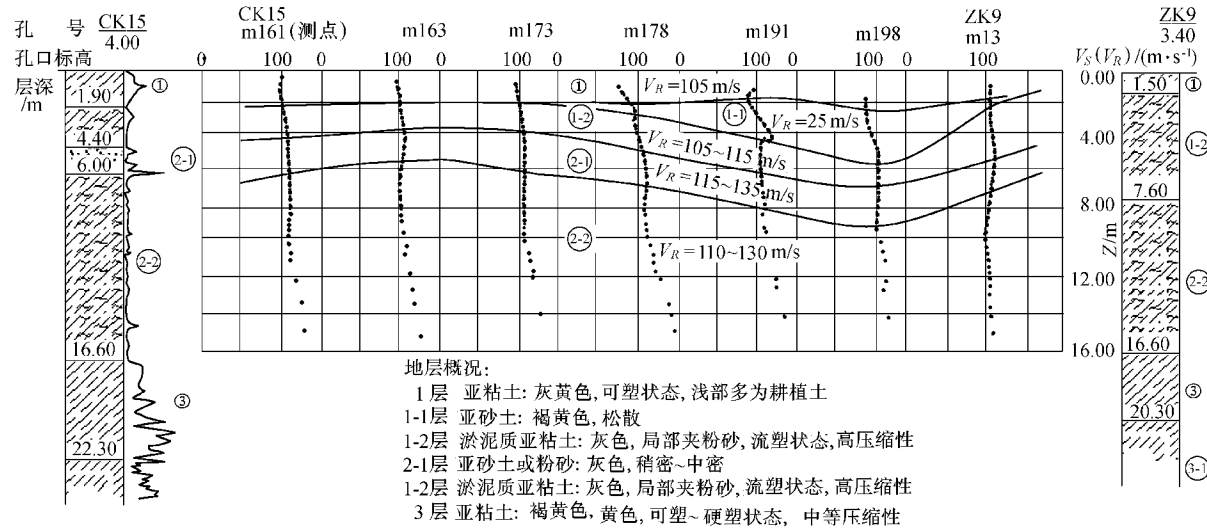
软土区面波法分层效果分析如下。检验面波法对软土分层的效果是本次试验的目的之一,因此面波测点除布置在钻孔附近之外,还在两孔之间布置了一些,试图根据各测点频散曲线相似性特征勾画波速界线,与钻孔资料对比进行波速分层。分层结果见图 3。

图 3(a)是七灶河北 K12+018~K12+924(CK15 至 ZK9)段钻孔、面波波速对照分层剖面图,CK15 为静力触探孔,ZK9 为机械取样钻孔,其间共布置 7 个面波测点,各面波频散曲线形态较相似,除有个别拐点较明显外,曲线均较平滑,说明各层位波速均较低,层间差异不大,波速分层结构不明显。在这种情况下,若无钻孔对照,仅由波速进行分层,分层精度自然也不高。

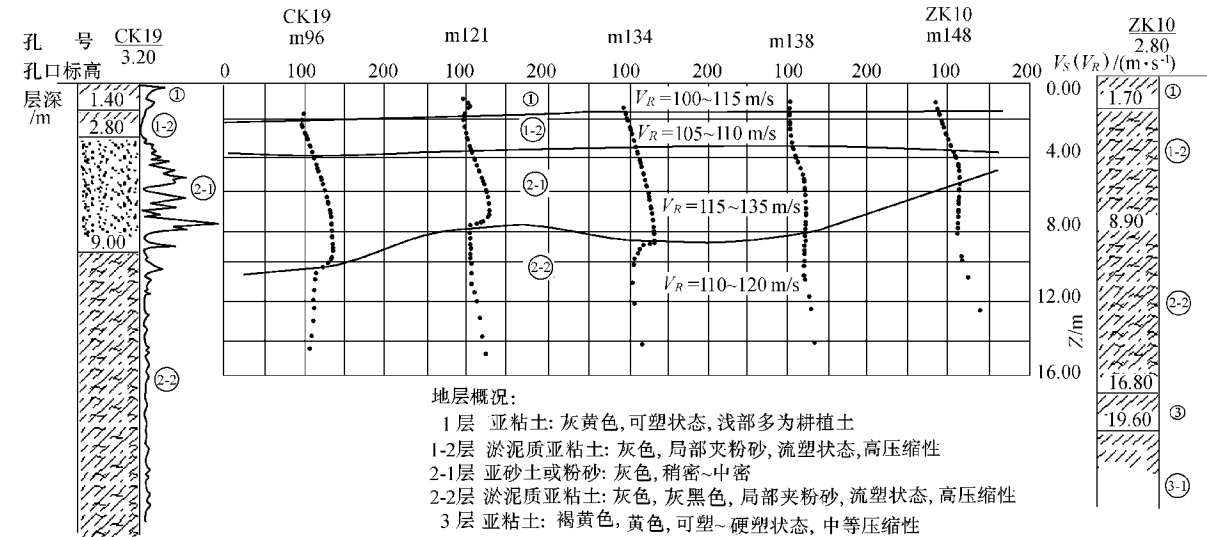
图 3(b)是七灶河南 K13+960~K14+550(CK19 至 ZK10)段钻孔、面波波速对照分层剖面图,CK19 为静力触探孔,ZK10 为机械取样钻孔,其间共布置 5 个面波测点。对照 CK19 静力触探图,2-1 与 2-2 层之间频散曲线中均出现较明显的“拐点”,反映两层波速相差较大,但该现象在 m148 测点(相当于 ZK10 位置)已不明显,波速稍高的 2-1 地层已消失,这与 ZK10 孔资料一致。同时获得各层的面波波速值,如“1-2 层”软土层 $V_R = 105 \sim 110 \text{ m/s}$,计算得出土层承载力 $f_k = 60 \sim 70 \text{ kPa}$ 。该剖面的测试结果表明,对于波速差异较明显、层厚度较大的地层,面波法分层具有相当的可靠性。

图 3(c)是三十里河南 K18+100~K18+685(CK25 至 ZK14)段钻孔、面波波速对照分层剖面图,CK25 为静力触探孔,ZK14 为机械取样钻孔,其间共布置 6 个面波测点,除 m101 测点外,各频散曲线形态较相似。此段“1-2 层”厚度较大,为淤泥质亚粘土夹粉砂,层内分布不均匀(CK25 中有反映),该层在 CK25 孔位置厚约 10 m,而在 ZK14 位置厚度仅 2 m。通过面波测试,对各测点频散曲线段波速分层,获得两孔间“1-2 层”软土地层的深度变化特征。同时,还获得各层的面波波速值:“1-2 层”软土层 $V_R = 115 \sim 125 \text{ m/s}$,计算得出土层承载力 $f_k = 75 \sim 86 \text{ kPa}$;“2-1 层”亚砂土层, $V_R = 155 \sim 175 \text{ m/s}$,计算得 $f_k = 123 \sim 150 \text{ kPa}$ 。

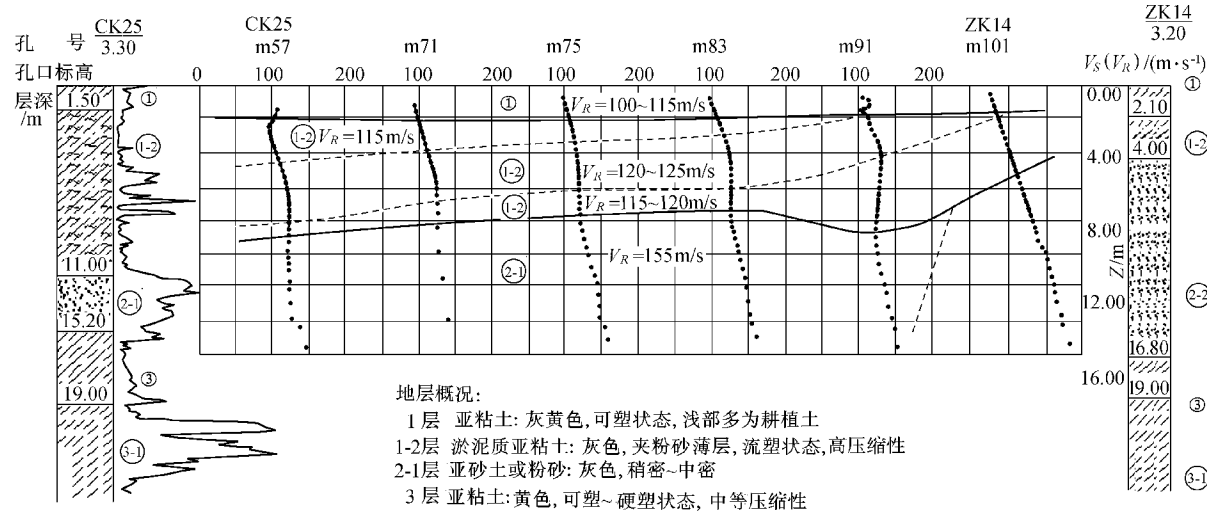
由以上分析可看出,根据面波法实测波速值,可以区分软土或非软土地层。若层与层之间存在较明显的波速差,而且层厚度较大,结合一定数量钻孔,可以根据波速变化进行分层,获得比较连续的地层剖面。但土层性质(岩性命名)必须对照附近钻孔(或静探)资料才能确定。若层之间波速无明显差异,或层厚度较薄,仅依据面波资料分层,则难度很大、精度不高,资料只能供参考用。



(a) K12+018~K12+924钻孔、面波波速对照分布剖面图



(b) K13+960~K14+550钻孔、面波波速对照分布剖面图



(c) K18+100~K18+685钻孔、面波波速对照分布剖面图

图3 各试验段钻孔及面波波速对照剖面图

Fig.3 Profile of holes and surface wave velocity for each test section

4 关于面波法精度和深度试探

本次外业施工着重对波速测定精度和勘察深度做了方法试验 ,所做工作如下 :

- a. 检波器及道一致性试验 .在 30 只检波器中 ,通过一致性对比 ,挑选 12 只性能最佳检波器用于测试工作 ,以确保面波观测精度 .
- b. 每个测点均布置在地势平坦、地表条件较一致地段 ,以消除地形变化对波速测试精度的影响 .
- c. 每个测点均做了不同偏移距(6 m ,10 m 和 15 m)和记录长度(512 ms 和 1 024 ms)观测 ,将多个记录进行对比 ,挑选最佳记录用于波速计算 .
- d. 本次使用 24 磅大锤敲击震源 ,为减低激发频率 ,提高勘察深度 ,试验了 3 种敲击方式 ,即铁板垫板、硬木板垫板和直接敲击路面 .试验结果表明 ,后两种方式效果稍佳 ,激发主频较低 ,而且面波记录干扰较小 ,但这些措施对提高勘察深度仍不明显 ,探测深度在 12 ~ 15 m 范围 ,即 12 m 以浅精度较好 ,12 ~ 15 m 深度记录可靠性减低 ,15 m 以下的记录已不可靠 .有关提高勘察深度问题仍需做试验 .有两种方案 :一是改用落锤震源 ,将质量约 50 kg 的铁球(或用标贯锤)抬高 1 m 左右 ,做自由落体敲击地面 ,可获较低主频面波 ;另一种方法是做一个砂袋 ,放在地上 ,用落锤或铁锤敲击砂袋 .由于砂袋有一定的滤波作用 ,而且确保激发条件一致 ,所以该方式建议在以后测试中采用 .

5 结 束 语

面波方法是工程物探中的一种新方法 ,从原理、施工至解释目前均不够完善 ,特别是将该方法用于软土勘察的经验不多 ,所以进行试验是必要的 .试验结果表明 ,根据面波法实测波速值 ,可以区分软土或非软土地层 .若层间存在较明显的波速差 ,而且层厚度较大时 ,结合一定数量的钻孔 ,可以根据波速变化进行分层 ,获得比较连续的地层剖面 .但许多方面还需进一步改进和提高 .从目前的观测水平看 ,面波方法资料解释还离不开钻探(或静探)资料对比 ,因此 ,两者要很好地加以结合 .

参考文献 :

[1] 王振东 .浅层地震勘探应用技术[M].北京 :地质出版社 ,1988.264—277 .
[2] 杨成林 .瑞雷波勘探[M].北京 :地质出版社 ,1993.35—80 .

Experimental study on reconnaissance of soft foundations by Reyleigh surface wave method

CAO Sheng-hua¹ , YANG Xiao-dong² , ZHU Zheng-kun² , LEI Xiao³

- (1. Jiangsu Provincial Sutong Bridge Construction Headquarters , Nantong 226009 , China ;
- 2. Jiangsu Provincial Planning and Design Institute , Nanjing 210001 , China ;
- 3. The 2nd Road and Bridge Bureau , Ministry of Communications , Xi 'an 710001 , China)

Abstract :An introduction is given to the detecting principle of the surface wave method and its application to survey of soft foundations and weak strata . Analysis shows that the soft and non-soft strata can be distinguished according to the measured velocity of surface waves . If obvious differences exist between the wave velocities in different strata , and the thickness of the strata is large , by a certain number of holes bored , the soft foundation can be stratified based on the variation of wave velocity , and continuous stratum profiles be obtained , so the method can reduce the work load of boring .

Key words :Reyleigh surface wave method ; soft foundation ; reconnaissance