

瑞雷波法在高速公路软基加固检测中的应用技术初探

缪荣辉

(宁德市高速公路建设指挥部 宁德 352100)

摘要 利用人工激发的瑞雷波在分层介质中传播时的频散特性和瑞雷波传播速度与介质的相关性,解决公路软土地基加固处理综合效果的评价问题,将其应用某高速公路上,取得了较好的效果。

关键词 瑞雷波法 高速公路 软基加固 检测 评价

瑞雷波(简称R波)是一种表面波,其在波的传播方向垂直平面内振动,质点的振动轨迹为逆时针方向转动的椭圆,且振幅随深度呈指数函数急剧衰减,传播速度略小于横波。随着计算机的发展,70年代以来,渐渐出现利用人工激发的瑞雷波来解决浅层工程地质问题的技术研究。

1 瑞雷波的传播特性

瑞雷波(R波)在半无限弹性空间介质中的重要传播特性,逐渐被人们所重视,其中包括:

- (1)R波沿深度方迅速衰减,其穿透深度约为一个波长;
- (2)R波沿水平方向,相对于S波(横波)、P波(纵波)衰减很慢,一般认为在一个波长以外主要的波动能量只有R波;
- (3)R波的高频部分在浅层传播,低频部分在较深范围内传播;
- (4)均质介质中无频散性;
- (5)非均质介质中的频散特性。

以上特性为瑞雷波勘探提供了充分的理论依据,为其开发利用奠定了基础,具有广阔的应用前景。

2 检测公路软基处理效果的基本原理

R波沿地面表层传播,表层的厚度约为一个波长,因此,同一波长的R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R波的传播特性反映了不同深度的地质情况。在地面上沿波的传播方向,每 Δx 间距设置 $N+1$ 个检波器,就可以

检测到R波在 $N\Delta x$ 长度范围内的传播过程,设瑞雷波的频率为 f_1 ,相邻检波器记录的R波的时间差为 Δt ,则 Δx 长度内R波的传播速度为:

$$V_R = \Delta x / \Delta t$$

测量范围 $N\Delta x$ 内平均波速为:

$$V_R = N\Delta x / \sum_{i=1}^N \Delta t$$

在同一地段测量出一系列频率的 V_R 值,就可以得到一条 V_R-f 曲线,即所谓的频散曲线或转换为 $V_R-\lambda_R$ 曲线, λ_R 为波长:

$$\lambda_R = V_R / f$$

V_R-f 曲线或 $V_R-\lambda_R$ 曲线的变化规律与地下地质条件存在着内在联系,通过对频散曲线进行反演解释,可得到地下某一深度范围内的地质构造情况和不同深度的瑞雷波传播速度 V_R 值。另一方面, V_R 值的大小与介质的物理特性有关,据此可对岩土的物理性质做出评价。

在野外一般采用瞬态法采集数据,即在地面上产生一瞬时激振力产生一定频率范围的瑞雷波,不同频率的瑞雷波叠加在一起,以脉冲的形式向前传播。瞬态法记录的信号要经过频谱分析,相位谱分析,把各个频率的瑞雷波分离出来,从而得到1条 V_R-f 曲线或 $V_R-\lambda_R$ 曲线。

由于在采集的信号中不可避免的存在一定成份的P波、S波及其他噪声信号,在信号分析时要用到波形剪切、置零、数字滤波技术以及检验信号相关性的相关分析技术。

瞬态法原理如图1所示。

作者简介:缪荣辉(1968),男,福建寿宁人,本科,工程师。

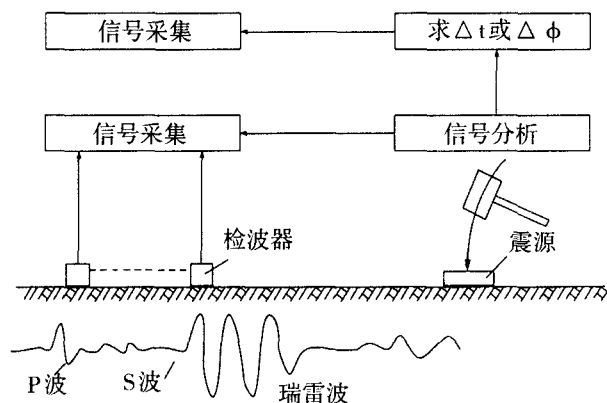


图1 瞬态法原理示意图

3 检测公路软基处理效果的实施方法

根据高速公路的实际情况,按以下步骤实施:

(1)在公路软基处理前,根据测试路段的地质资料和软基处理深度,选择工作频率范围和频率间隔,软基处理深度即是测试深度,波长 λ_R 和场地内波速成正比,与频率成反比,测试深度与波长 λ_R 成正比:

$$H = \beta \lambda_R$$

式中 β ——波长深度转换系数。

两检波器距离为 Δx ,为了使得两检波器接收的信号有足够的相位差, Δx 应满足下式:

$$\lambda_R/3 < \Delta x < \lambda_R$$

因此随着测试深度的增大,即 λ_R 增大, Δx 也应增大。如图2所示

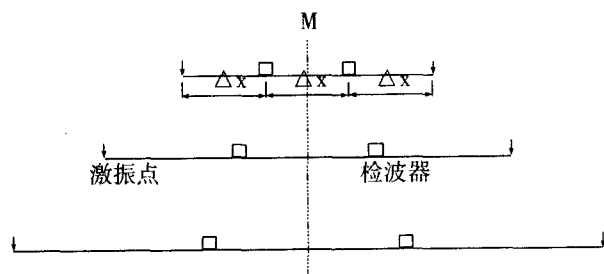


图2 瞬态法排列布置示意图

(2)根据测试深度,选择激振力,即选择震源的质量和体积。一般的进行浅部测试时,可采用小铁锤,当测试深度较大时,可采用大铁锤或重铁块。在实际应用中,须在测试现场,根据要求的频率范围及分辨率进行试验,以筛选出合适的震源重量和高度。

(3)设置测试断面。如果有条件,可以在软基处理前对原地面进行测试,作为基础数据。如软基处

理前,对原地面没有测试,则可以在路基外侧一定距离沿公路纵向设置一个断面进行测试,作为基础数据。软基处理范围内,沿公路中线纵向和测试断面各布设一条,如图3所示。

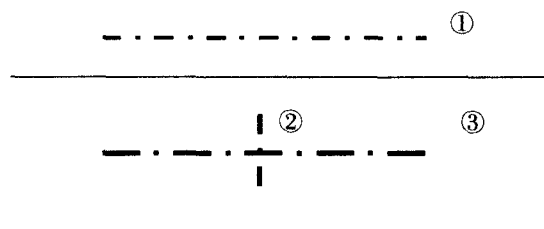


图3 测线布设

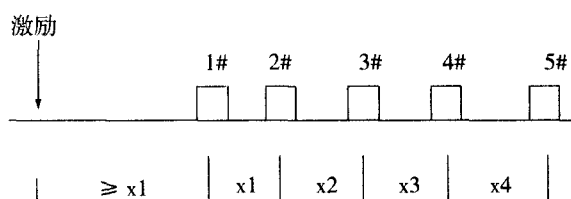


图4 激励、测线、探头布设示意图

①号测线原状土测线;

②号测线在已处理的路基中间,沿公路纵向;

③号测线在已处理的路基上,垂直路基轴线方向。

每测线上布置4~5个探头,间距 Δx_i ,如图4所示。

(4)激励和信号采信。激励方式采用瞬态激励,震源1#探头的距离大于等于1#-2#探头的间距,见图4。响应信号由铅垂向高灵敏度中低频速度传感器拾检。

(5)数据分析及软基处理效果定类。由上述测试、分析理论,求得瑞雷波弥散特性曲线及由反演计算求得深度与土层各力学参数间的关系曲线。

目前国内外对横波波速(V_s)与土层的标准贯入击数($N_{63.5}$)的关系,作了大量研究工作,工程上用 $N_{63.5}$ 值可确定土层的承载力。根据国内外的统计的 V_s 与 $N_{63.5}$ 的关系可看出,二者之间服从指数相关关系,即 $V_s = A N_{63.5}^B$,不同地区或同一地区不同性质的土层,系数A、B不同,所以 V_s 与 $N_{63.5}$ 的相关性具有地区性和地层类别的属性。中科院工程力学所推荐的 V_s 、 $N_{63.5}$ 与地层深度的关系式为:

$$V_s = K \cdot 62.14 \cdot N_{63.5}^{0.219} \cdot H^{0.230}$$

粘性土取 $K = 1$,细砂取 $K = 1.091$,中砂取 $K = 1.029$,粗砂取 $K = 1.073$,砾砂取 $K = 1.151$,砾石取 $K = 1.485$ 。

根据我们对瑞雷波速和横波对比研究表明,瑞雷波和横波传播速度间存在一定的比例关系,一般情况下 $V_R = K_2 V_S$, K_2 取 0.92~0.95。

复合地基的承载力是由桩和土共同承担,其承载力为:

$$R_t = (R_s \cdot S_s + R_p \cdot S_{\text{桩}}) / S$$

式中 R_t ——复合地基承载力;

R_p ——桩的承载力;

$S_{\text{桩}}$ ——桩的截面积;

R_s ——土的承载力;

S_s ——土的面积;

S ——总面积。

在现场分别实测出桩间土和复合地基的 V_R 值,计算出复合地基承载力 R_t 和桩间土承载力 R_s ,然后根据复合地基承载力计算公式计算出粉喷桩的桩承载力。通过取芯、复合地基承载力试验等传统测试方法设立对比试验断面,可建立传统试验结果与软基处理前后瑞雷波速的增加值、绝对值、有效处理深度等数据的相关关系。

4 工程实例

(1) 工程概况

该段软基土层情况自上而下为:

- ① 中密、湿~饱和、厚度 1.4~2.2 m 的素填土;
- ② 饱和、软~流塑、厚度 2.1~5.3 m 的淤泥;
- ③ 饱和、软~硬塑、厚度 2.0~5.9 m 的亚粘土;
- ④ 饱和、中密~密实、厚度 3.7~5.2 m 的卵石

质亚粘土;

- ⑤ 饱和、中密、厚度 0.6~2.3 m 的中粗砂;

⑥ 饱和、软~硬塑、厚度 14.7~21.0 m 残积亚粘土;

- ⑦ 湿、密实,最大揭示厚度 4.0 m 全风化花岗岩;

- ⑧ 湿、揭示厚度 2.8~4.2 m 的强风化花岗岩。

该段软基处理采用粉喷桩,桩径 500 mm,桩长约 7 m 左右,桩端持力层为卵石质亚粘土层。设计单桩承载力 300 Kpa,复合地基承载力 150 Kpa。

(2) 效果评价

本次测试采用北京东方震动与噪声研究所的 INV 振动、波动信号智能测试系统,高灵敏中低频的速度传感器。激励采用 8 磅铁锤及 $\phi 90$ 、60 Kg 重的钢棒。

根据实测的 1#、2#、3# 3 个断面的时域信号进行波形的相关分析和处理,得出这 3 个断面的瑞雷波频散曲线,如图 5~7。从瑞雷波频散曲线得出:

- ① 1# 断面的加固效果最好,加固前后瑞雷波速提高约 60 m/s,加固后对应的波速达 145 m/s;

- ② 2# 断面的加固效果比较差,加固前后瑞雷波速提高约 30 m/s,加固后对应的波速达 80 m/s;

- ③ 3# 断面的加固效果一般,加固前后瑞雷波速提高约 40 m/s,加固后对应的波速达 100 m/s。

对瑞雷波检测结果进行计算分析可知:3 个断面加固处理的影响深度均约为 7 m,复合地基承载力均随着深度增加而提高,3 个断面的计算结果与传统检测方法的实测值对比见表 1,从表 1 可看出,两方法的结果大致吻合。

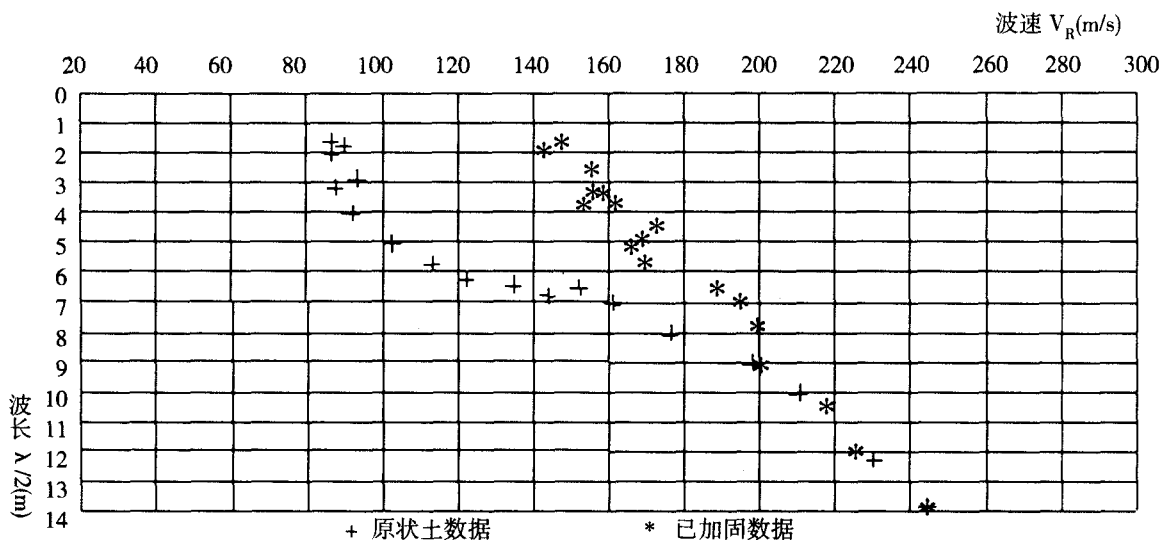


图 5 1#断面瑞雷波频散曲线

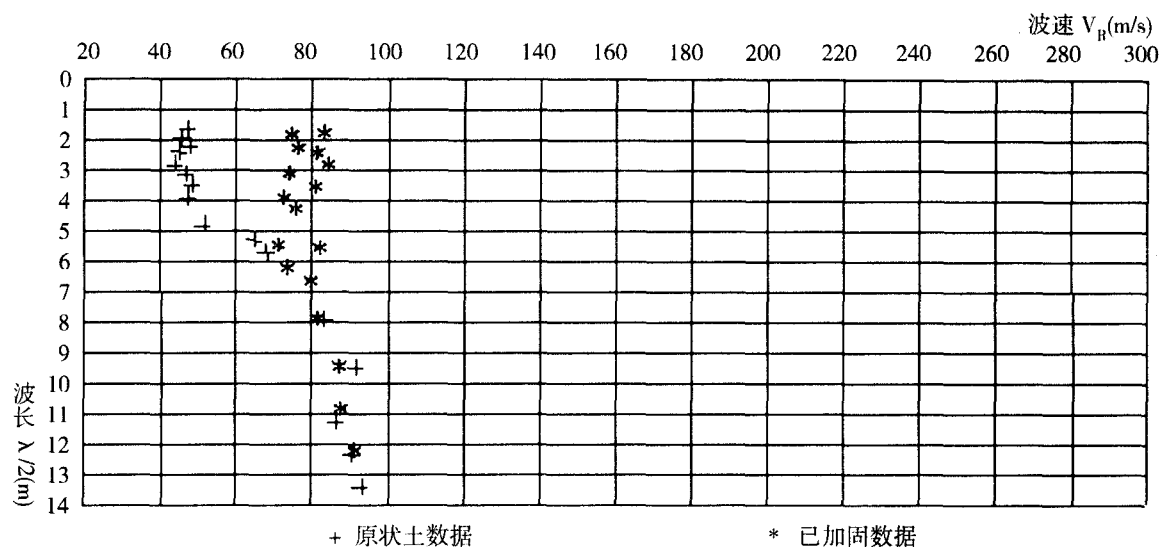


图6 2#端面瑞雷波频散曲线

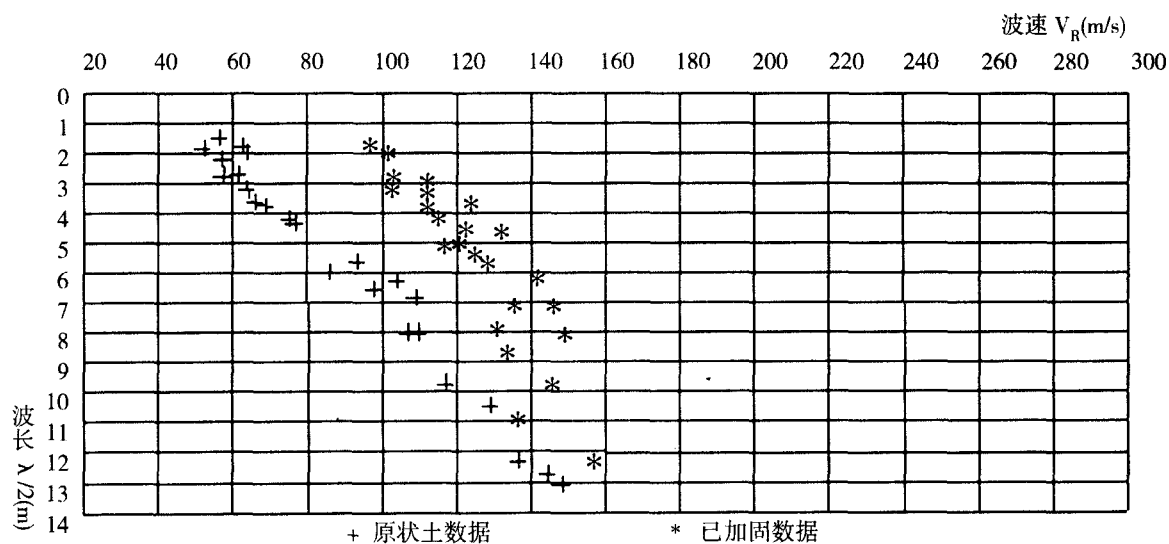


图7 3#端面瑞雷波频散曲线

表1 复合地基承载力瑞雷波计算值与实测值对照表

断面号	单桩承载力(KPa)		复合地基承载力(KPa)	
	计算值	实测值	计算值	实测值
1#	450	> 306	180	> 151
2#	320	> 306	90	91
3#	320	> 306	135	151

5 结论

(1)公路软土路基加固处理效果的瑞雷波检测是通过检测路基加固前后的波速差异,得到处理后物理力学性质的改善程度,确定加固影响的深度和

范围,确定复合地基承载力。

(2)通过对瑞雷波监测和取芯、复合地基承载力试验等传统测试方法设立对比试验,瑞雷波检测结果与传统检测结果大致吻合,检测结果可靠。

(3)瑞雷波检测是一种无损伤、快速的监测方法,本实例的检测与分析是在一天内完成,这一检测速度比传统的单桩、复合地基承载力试验效率高,费用省。

(4)瑞雷波检测对于公路工程地质勘察、路基承载力监测、软土路基加固效果评价等方面均有广泛的应用前景。深入开展瑞雷波现场测试技术、监测资料的解释、正反演计算分析和与传统检测方法的对比分析研究,具有重要意义。