

# 瞬态瑞雷波法在工程检测中的应用

童立元 陈征宙 方 磊 刘松玉

(南京大学地球科学系 210093) (东南大学岩土工程研究所 南京 210096)

**摘 要** 将瞬态瑞雷波法应用于高速公路工程检测中,充分发挥了其简便可行、经济合理的优点。现场试验表明,瞬态瑞雷波法在地基液化势判别及强夯、挤密碎石桩等地基处理检测中,与标贯等常规检测方法相比,具有较好的一致性,适宜于在高速公路工程检测中推广应用。此外,应在两个方面加大研究力度:一是优化反演方法,二是多分量勘探方法的探索。

**关键词** 瞬态瑞雷波法;频散曲线;反演;液化势;强夯法;挤密碎石桩

**分类号** P631.422

瑞雷波勘探技术作为一种原位测试方法越来越受到国内外工程物探界的重视。由于激振方式的不同,该法分为稳态和瞬态两种,其中瞬态瑞雷波法又称表面波频谱分析法,简记为SASW法(Spectral Analysis of Surface Wave)<sup>[1]</sup>。国外自50年代就开始了该法的应用研究,其中尤以在美日两国发展最快<sup>[2]</sup>,而国内自80年代以来,许多学者及单位都相继开展了SASW法的研究和应用,取得了可喜成果并推动了该项新技术的发展。笔者鉴于近几年国内高等级公路的发展现状及要求,于1997年至今将该项勘察技术应用到某高速公路的建设中,并以此为基础,初步探讨了SASW法的优点、应用范围、存在问题及未来发展趋势。

## 1 SASW法勘探原理

### 1.1 瑞雷波传播特征

瑞雷波的实质是纵波与横波垂直分量在界面附近的迭加和放大,它的能量大,传输速度低( $V_r < V_s < V_p$ ),衰减慢,因而信号易于提取。瑞雷波的能量差不多只集中于一个波长 $\lambda_r$ 的范围内,也就是说在一定的深度范围内,可以选择一定的波长 $\lambda_r$ ,其速度提供的信息,只在一个波长范围内,这对工程测试,其深度不大时(一般在数十米范围内),显然是极为有利的。

瑞雷波的另一重要特征就是当瑞雷波在均匀介质中传播时,无频散特性。但是当瑞雷波在非均匀层状介质中传播时,不同频率的瑞雷波其传输速度是不同的,这种频散特性为将其应用到工程实践中提供了重要前提条件。另外,由半波长理论知,地面测得的速度 $V_r$ 反映了二分之一波长深度内介质的平均弹性性质,因 $\lambda_r = V_r / f$ ,在某一特定地区 $V_r$ 与采集方式和参数无关,而只与岩土特性有关,其变化范围是一定的,所以,波长 $\lambda_r$ 主要取决于频率 $f$ ,不同频率的瑞雷波有不同的波长, $f$ 的变化反映了不同深度内介质平均性质的变化,低频反映了深层的信息,高频则反映了浅层的信息。

1999-03-25收稿,1999-05-10改回。

第一作者简介:童立元,男,1975年出生,硕士研究生,岩土工程专业。

### 1.2 勘探原理<sup>[2]</sup>

在瞬态激励下，地面将产生直达波、反射波、折射波、面波及声波等扰动波，其中面波能量最强，约占传播总能量的67%。瑞雷波沿地面传播，其穿透深度约为一个波长，同一 $\lambda_r$ 的瑞雷波传播特征反映了介质性质在水平方向的变化情况，而不同 $\lambda_r$ 则反映了不同深度的地下情况。在地面上沿瑞雷波传播方向以一定的道间距 $\Delta x$ 设置 $(N+1)$ 个检波器，就可检测到 $(N\Delta x)$ 长度范围内的传播过程。设瑞雷波的频率是 $f$ ，相邻检波器的时差为 $\Delta t$ ，相位差为 $\Delta\Phi$ ，则相邻道 $\Delta x$ 长度内

$$V_r = \Delta x / \Delta t \quad \text{或} \quad V_r = 2\pi f \Delta x / \Delta\Phi$$

测量范围 $(N\Delta x)$ 内平均波速为<sup>[1]</sup>：

$$\bar{V}_r = N\Delta x / (\sum_{i=1}^N \Delta t_i) \quad \text{或} \quad \bar{V}_r = 2\pi f N\Delta x / (\sum_{i=1}^N \Delta\Phi_i) \quad (1)$$

在同一测点对一系列频率 $f_i$ 求取相应的 $V_{ri}$ 值，就可得到一条 $V_r - f$ 频散曲线，由于 $\lambda_r = V_r / f$ ，所以还可将该曲线变换成 $V_r - \lambda_r$ 曲线。这两种曲线均与地下地质条件密切相关，通过对频散曲线进行反演分析，就可得到地下某一深度范围内的地质情况及地下速度结构。

另外，在岩土工程和地基处理中，剪切波速 $(V_s)$ 因与岩土的动力学参数、岩土介质的工程性质密切相关而得到广泛应用，如高层建筑的抗震设计、地基液化势判别、建筑场地分类等都能用到 $V_s$ ，因此 $V_s$ 的取得十分重要。传统上， $V_s$ 的获取一般采用跨孔法、下孔法、反射波法等方法，但这些方法或由于误差大或由于设备笨重，受

表1  $(V_r/V_s)$  与  $\mu$  关系<sup>[2,3]</sup>

Table 1 Correlation between  $(V_r/V_s)$  and  $\mu$

$\mu$	0.25	0.30	0.33	0.35	0.40	0.45	0.50
$V_r/V_s$	0.919	0.928	0.933	0.935	0.943	0.949	0.956

注： $\mu$ 为泊松比； $V_r$ 、 $V_s$ 分别为瑞雷波和剪切波速度。

于误差大或由于设备笨重，受场地制约因素过多而限制了其应用范围。因瑞雷波速与剪切波速之间有一定相关关系（式(1)，表1），这就为以瑞雷波速为桥梁求得剪切波速及各种力学参数提供了前提条件。

$$V_r = (0.87 + 1.12\mu) V_s / (1 + \mu) \quad (2)$$

## 2 工程应用

### 2.1 砂土地基液化势判别

某高速公路 $E_7$ 标段地处古黄泛平原，广泛分布亚粘土、亚砂土、饱水粉细砂等易液化地基土，液化势以中等—严重液法为主。国内液化判别通常使用标准贯入法和剪切波速法。应用 $V_r$ 与 $V_s$ 的相关关系式（式(1)），从 $V_r$ 反推 $V_s$ ，对地基土进行液化势判别，并与标贯法判定结果对比。工作区如图1，结果见表2（注：地基处理前进行）。很明显两种方法的结果基本上相一致，这就为地基液化势判别提供了一种更有效更简单的新方法、新技术。

### 2.2 强夯法加固地基效果检测

根据《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)， $E_7$ 标段液化地基必须进行处理，方法之一

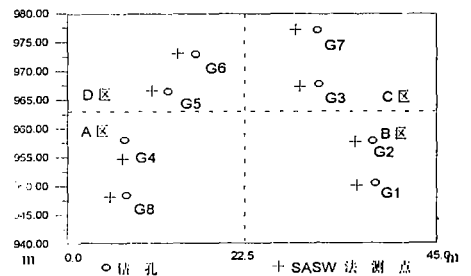


图1  $E_7$ 标试验区夯前测试布置图

Fig.1 Distribution of observing points in  $E_7$  area before tamping

是强夯法。强夯试验区仍为图1所示区段。采集到的夯前、夯后R波频散曲线见图2、图3。

表2 SASW法与标贯法判断地基液化对比结果

Table 2 Comparison of method SASW and SPT in analyzing liquefaction

孔号	土号	土类	深度 /m	实测 $V_r$ /( $m \cdot s^{-1}$ )	计算 $V_s$ /( $m \cdot s^{-1}$ )	计算 $V_{sr}$ /( $m \cdot s^{-1}$ )	SASW法结果	标贯法结果
G8	8-1	亚砂土夹粉土	2.5	108.2	116.6	135.5	液化	轻微液化
	8-2	亚砂土夹夹粉细砂	5.4	89.5	96.4	142.6	液化	严重液化
G2	2-1	亚砂土夹粉土	2.3	92.1	99.2	134.9	液化	中等液化
	2-2	亚砂土夹粉土	4.6	86.4	93.1	141.7	液化	严重液化
G3	3-1	亚砂土夹粉土	2.1	76.7	82.7	135.3	液化	中等液化
	3-2	亚砂土夹夹粉细砂	4.9	57.3	61.7	142.5	严重液化	严重液化
G5	5-1	亚砂土夹粉土	2.6	106.5	114.8	136.6	液化	中等液化
	5-2	亚砂土夹夹粉细砂	5.2	97.3	104.8	141.0	液化	严重液化

注:  $V_{sr}$ 采用国家地震局工程力学所推荐的判别式计算。

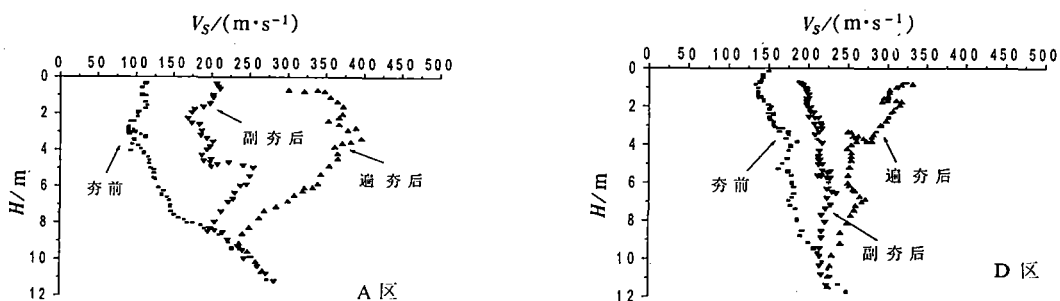


图2 强夯前后频散曲线对比 (A区, D区)

Fig.2 Comparison of dispersive curves between pre- and post-tamping (areas A, D)

由上面这些图件可得出以下一些结论:

(1) 夯后地基波速  $V_s$  较夯前有大幅度提高, 可用地基加固系数  $\alpha$  来评价:

$$\alpha = 100\% \cdot (V_{s后} - V_{s前}) / V_{s前}$$

经计算, 夯后  $\alpha$  平均达到 50%~200%。

(2) 遍夯后, 各区地基土  $V_s$  较副夯仍有较大提高, 平均有效加固深度为 9 m 左右, 这与静力触探 (CPT) 和标贯 (SPT) 测试结果一致;

(3) 地基土  $V_s$  随时间的延伸而提高, 但幅度不大;

(4) 夯后 1 个月到 2 个月由  $V_s$  判断, A、B、C、D 4 个区均不液化。

总体上, 由 SASW 法判断, 处理效果较好, 符合设计要求, 结论与标贯等方法相同。

### 2.3 挤密碎石桩复合地基加固效果检测

E7 标段同时还进行了用挤密碎石桩来加固易液化地基的试验。瞬态瑞雷波法某测区的频

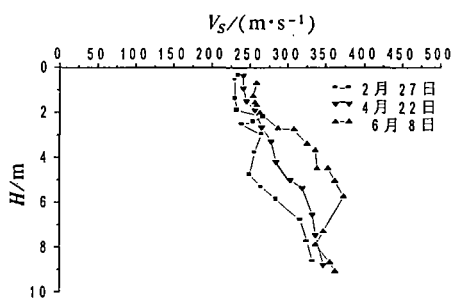


图3 不同时期剪切波速对比 (C区)

Fig.3 Comparison of shear wave velocity in different periods (area C)

散曲线如图4~图6, 其中图4是将测点布置在桩间土上, 图5是将测点布置在桩头上。

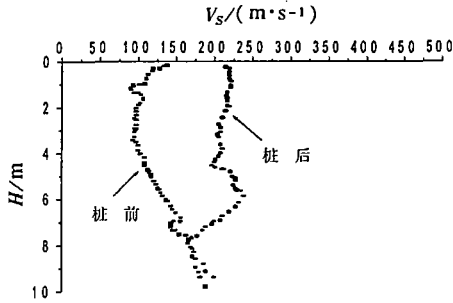


图4 桩间土频散曲线

Fig.4 Dispersive curves of soil between piles

由图中可以看出:

- (1) 桩间土和桩头频散曲线大致相同, 这表明经碎石桩加固后的地基, 整体均匀性较好;
- (2) 地基强度亦有较大幅度提高, 各深度波速  $V_s$  均大于 200 m/s, 符合设计要求。
- (3) 地基强度随时间增长略有提高, 幅度不大。经与 CPT、SPT 检测对照, 结果一致性较好。

### 3 结论

从以上几个典型实例表明, 瞬态瑞雷波法应用于工程检测工作中具有下面几个优点:

- (1) 传统上, 工程质量检测主要采用标贯法、静载试验法、钻孔取芯法等, 但所得结果往往为点式, 难以推广至面的范围。在检测工作中联合标贯与瑞雷波法, 点面结合, 较好地解决了传统方法的片面性;
- (2) 浅层分辨率高, 检测深度可通过改变频率来控制, 灵活性大;
- (3) 瑞雷波法不仅具有标贯和静力触探似的垂直勘探能力, 而且当沿测线进行工作时, 也具有横向探测能力, 因而更适合于大面积处理地基的检测, 特别是高速公路这种大型线性工程;

- (4) 设备轻便, 工效高, 成本低廉, 必要时可进行实时处理, 快速提供资料。

同时, 在实践中也发现, 瞬态瑞雷波法也有一些缺陷, 限制了它的大力推广。

- (1) 地下介质沿横向变化较大时, 由于瑞雷波所得结果是测线下介质的平均性质, 从而导致该法结果与钻孔法等结果有一定误差;
- (2) 瞬态瑞雷波法易受多种干扰的影响, 如受震源、检波器, 地震仪三者频响特性影响, 受时间、空间采样率的影响, 受周围环境及非勘探目的物的影响等;
- (3) 在现场数据采集过程中, 为取得高信噪比的面波资料, 应选取合适的有关参数, 这往往需要事先进行一定数量的试验进行对比, 有时可能较麻烦;
- (4) 面波频散曲线反演方法有待提高<sup>[4]</sup>。目前常用的反演方法有近似计算法<sup>[2]</sup>、拐点法<sup>[2]</sup>、渐进线法<sup>[2]</sup>、最小阻尼二乘法<sup>[5]</sup>以及最近有人提出的遗传算法<sup>[5,6]</sup>、奇异值分解算法<sup>[7]</sup>

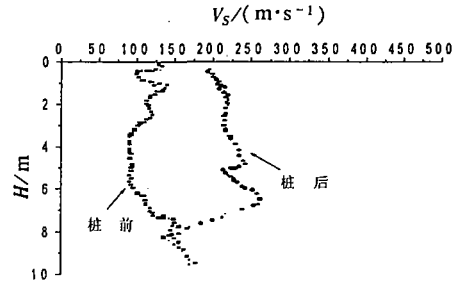


图5 桩头频散曲线

Fig.5 Dispersive curves of heads of piles

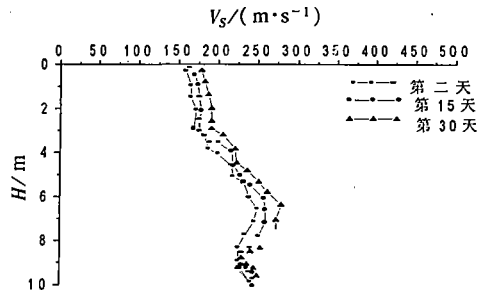


图6 不同时期剪切波速对比

Fig.6 Comparison of shear wave velocity in different periods

等。但这些方法都不同程度地存在一些问题,如前三种算法对深度的解释结果有很大的不可靠性;最小阻尼二乘法要求有较好的初始模型,反演结果误差较大;而遗传算法虽一种较新的全局反演优化方法,但计算量大,反演迭代次数有时甚至高达 $10^5$ 。

虽然瞬态瑞雷波法有以上几个缺点,但随着理论研究的不断加深,其在工程勘测和检测中的应用领域将更加广阔。今后研究重点可着重放在两个方面:①优化反演方法,寻找更能符合实际的解释途径;②针对目前多采用单分量接收垂向信息的情况,今后可加大多分量勘探方法的研究<sup>[8]</sup>。

#### 参 考 文 献

- 1 吴世明,唐有职,陈龙珠. 岩土工程波动勘测技术. 北京:水利电力出版社, 1992: 89~117
- 2 杨成林. 瑞雷波勘探. 北京:地质出版社, 1993: 1~80
- 3 陈仲侯,王兴泰,杜世汉. 工程与环境物探教程. 北京:地质出版社, 1993: 16, 71~75
- 4 Alekseev A S, Zherniak G F. Inverse dynamic problems and seismic methods for determination of the structure a medium. J Gophysics, 1985, 57: 164~171
- 5 赵 东,王光杰,王兴泰,等. 用遗传算法进行瑞利波反演. 物探与化探, 1995, 19 (3): 178~185
- 6 Stoffa P L, Sen M K. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane - wave seismograms. Geophysics, 1991, 56: 1794~1810
- 7 胡家富,温一波,谢应齐. 利用地震面波频散反演岩石圈结构的奇异值分解算法. 地球物理学报, 1998, 41 (3): 211~217
- 8 李锦飞. TRES-I型多分量瑞利波勘探仪的研究及应用. 物探与化探, 1998, 22 (2): 129~133

## THE APPLICATION OF THE TRANSIENT RAYLEIGH WAVE METHOD TO ENGINEERING TESTING

Tong Liyuan Chen Zhengzhou

(Department of Earth Sciences, Nanjing University)

Fang Lei Liu Songyu

(Institute of Geotechnique, Southeast University, Nanjing)

**Abstract** The transient Rayleigh wave method is applied to the test of expressway project, and its advantages of simplicity and economy are also brought into full play. Through field testing, it is indicated that this kind of technique is in good agreement with those conventional methods (e. g., SPT) in the judgement of liquefaction and the test of heavy tamping field and stone compaction pile foundation. So, it is fit to popularize in expressway engineering testing. Besides, according to the study of its characteristics, it is proposed that two directions should be studied; one is the optimization of inversion methods, the other is the seek of multi-component Rayleigh wave exploration.

**Key words** transient Rayleigh wave method; dispersive curve; inversion; liquefaction; heavy tamping; broken stone compaction pile