

# 瞬态瑞雷波法在高速公路路基勘察中的运用

李修忠<sup>1,2</sup>, 卢成明<sup>1,2</sup>, 方卫华<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 武汉市 430074; 2. 河南省路通物探科技开发有限公司 郑州市 450006;

3. 河南豫濮高速公路发展有限公司 濮阳市 457000)

**摘 要:** 简要叙述了瞬态瑞雷波法勘探的基本原理,并结合工程实例,从野外数据采集到资料处理和解释,系统地介绍了瞬态瑞雷波法在高速公路路基勘察中的运用方法,并就该方法目前存在的问题进行了探讨。

**关键词:** 软土地基; 地基承载力; 瞬态瑞雷波; 频散曲线

近年来,河南省高速公路发展较快,计划至2007年底,全省高速公路总里程将达到4 100 km。为减少高速公路不均匀沉降、横向开裂和桥头跳车等常见病害,在高速公路修建过程中,勘察和设计是必须牢牢把握的2个关键环节。而勘察又是设计的基础,在工程地质勘察阶段,快速、全面、准确地获取沿线工程地质资料是做好工程设计的现实需要。瞬态瑞雷波法勘探正适应了这一需求,它结合钻探、静力触探等其他传统的勘探方法,在高速公路路基勘察中取得了较好的应用效果。本文以阿(荣旗)深(圳)高速公路河南省境内濮阳段天然地基承载力瞬态瑞雷波法勘探为例,介绍瞬态瑞雷波法在高速公路路基勘察中的运用及效果。

## 1 概况

阿(荣旗)深(圳)高速公路濮阳段是河南省境内最北端的一段,路段全长59.506 6 km。该路段主要穿越黄河冲积平原区,沿线地形平坦开阔,微向东北倾斜,局部微起伏,海拔在40~60 m之间,表层岩性为第四系全新统地层和上更新统地层。其中,第四系全新统( $Q_4^{al}$ )地层为黄河冲积沉积层,分布于全线路区范围,上部以粘性土为主,下部以砂性土为主,局部存在第四系全新统风积砂层。第四系上更新统( $Q_3^{al-pl}$ )地层为冲积、洪积层,层面呈波状起伏,与全新统呈不整合接触。该层又分为上更新统粘性土地层(顶板埋深一般在21.5~41.8 m)和上更新统砂性土地层(顶板埋深一般在31.2~58.0 m)。路段

内浅层富水性好,以第四系全新统砂性土、亚砂土中的潜水为主,水位埋深一般在17.5~22.5 m左右。为详细查明该路段天然地基承载力分布情况,为地基加固处理设计提供参考依据,采用了瞬态瑞雷波法。资料采集于2004年3月14日~2004年4月1日,2004年4月12日前完成了资料处理、解释和报告编写工作。

## 2 基本原理

瑞雷波是一种沿自由介质表面传播的面波,它具有以下3个基本特性。

(1) 在分层介质中,瑞雷波具有频散特性。波的传播速度与频率有关的现象称为频散。在半无限均匀弹性介质中,瑞雷波速度约为横波速度的0.9倍,无频散现象。而在分层的层状半无限空间中,当波长很短时,波速约为上层介质横波速度的0.9倍;当波长较长时,瑞雷波的速度约为最下层介质中横波速度的0.9倍;当瑞雷波的半波长接近介质的分界面距自由界面的深度时,频散曲线的变化较为显著,如图1所示。该特性是瑞雷波勘探的理论基础。

(2) 瑞雷波的波长不同,穿透深度也不同。瑞雷波是一种表面波,其振幅随离开自由表面的距离呈指数形式衰减,其能量一般都集中在介质表层约1个波长的深度范围内。所以,一般认为,瑞雷波的穿透深度约为1个波长的深度。该特性为利用瑞雷波进行浅层勘探提供了依据。在实际应用中,取瑞雷波的穿透深度约为0.55~0.875倍波长( $\lambda_R$ )的深度,

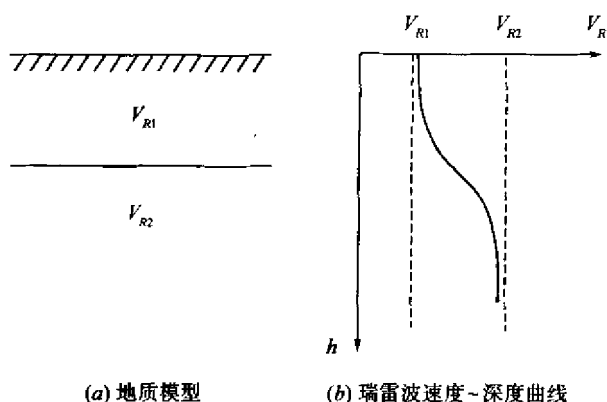


图 1 瑞雷波速度与深度关系曲线示意

具体随地区和岩性的不同而变化。对一般岩石,可取  $0.65\lambda_R$ ; 对于土体,可取  $(0.79 \sim 0.84)\lambda_R$ 。

由  $\lambda_R = V_R / f$  可知,瑞雷波不同的波长对应于介质在不同频率下的瑞雷波速度。通过探测不同频率下介质的瑞雷波速度,即可得到  $V_R \sim \lambda_R$  关系曲线,也即频散曲线。再根据瑞雷波在不同岩性介质中穿透深度与波长的关系,就可获得  $V_R \sim h$  关系曲线,也即速度~深度曲线,该曲线直接反映了地下某一深度范围内的地质构造情况或介质的“软”、“硬”分布情况。

(3) 瑞雷波传播速度与横波传播速度具有相关性。实测的  $V_R$  值直接反映了测试深度以上各层的加权平均波速,而瑞雷波速度  $V_R$  与横波速度  $V_S$  之间又具有以下确切的对应关系:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} V_S \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为岩土介质的泊松比,一般在  $0.25 \sim 0.50$  之间,介质越疏松,  $\sigma$  值越大。

根据式(1)可求得:

$$V_R = (0.92 \sim 0.95) V_S \quad (2)$$

利用该相关性即可得到地层的横波速度。横波速度与介质的物理力学参数密切相关,横波速度的大小直接反映了地层介质的“软”、“硬”程度,即:

$$E = 2V_S^2 \rho (1 + \rho) \quad (3)$$

式中:  $E$  为介质的弹性模量;  $\rho$  为介质的密度。

所以,根据以上相关关系,采用经验公式,并以已知的钻孔和静力触探资料作为约束进行标定,即可直接由瑞雷波速度近似求取地层的容许承载力等参数。

在实际运用中,瑞雷波及横波速度随地下介质的不同而变化的幅度,远大于二者之间换算系数引

起的波动变化量,所以,一般直接取  $0.93$  倍左右的横波速度值作为瑞雷波速度值进行反推换算。

### 3 野外数据采集

通过试验,本次勘探采用  $24$  道直线排列检波器,  $1 \text{ m}$  道间距、 $8 \text{ m}$  偏移距,沿排列线两端激发、 $2$  次叠加,为连续探测的观测系统(第一个排列与第二个排列重复  $1$  道)。观测系统排列布置如图 2 所示。接收采用每道单个速度检波器插置,激发采用  $63.5 \text{ kg}$  标准贯入试验锤落锤激发,记录仪采用 GEOPEN 2404EP-48 浅层地震仪,采样间隔  $0.2 \text{ ms}$ ,记录长度  $400 \text{ ms}$ ,全波接收。

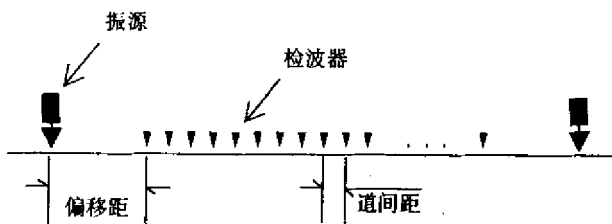


图 2 野外观测系统排列布置示意

### 4 资料处理

瑞雷波资料处理采用某单位与院校联合研制开发的“瑞雷面波资料处理与解释软件”系统。该系统与传统的瑞雷波处理方法相比具有以下几个方面的优点:

(1) 以人机交互方式,对瑞雷波在  $\tau \sim p$  域与时空域联合提取,使得波场分离效果更佳;

(2) 采用相邻道法计算频散曲线,提取的信息量更大,横向分辨率得到明显提高;

(3) 以取对数积分方式代替传统的富士变换方法,使得频率或深度间隔可任意给定,提高了对深层的纵向分辨率。

通过以上改进,该处理系统在去除干扰和提高纵、横向分辨率方面较传统的处理方法有了质的飞跃,将其用于天然地基勘察、高填路堤压实效果检测和复合地基处理效果评价等方面的资料处理,均取得了较好的效果。

根据实测频散曲线按以下计算公式进行地层划分:

$$V_R = \frac{H_{RN} V_{RN} - H_{R(N-1)} V_{R(N-1)}}{H_{RN} - H_{R(N-1)}} \quad (4)$$

式中:  $V_R$  为瑞雷波速度,  $\text{m/s}$ ;  $V_{RN}$ 、 $V_{R(N-1)}$  分别

为第  $N$  层和第  $N-1$  层的瑞雷波平均速度,  $\text{m/s}$ ;  
 $H_{RN}$ 、 $H_{R(N-1)}$  分别为第  $N$  层和第  $N-1$  层的层底深度,  $\text{m}$ 。

由计算出的瑞雷波层速度数据即可绘制沿线 20 m 深度范围内的瑞雷波速度剖面。

作为路基勘察的最终成果,往往直接用于描述地层岩土的物理力学参数(如地层承载力等)。瑞雷波速度或横波速度的大小虽然也直接反映了地层的软硬程度,但为了便于工程运用,有必要将瑞雷波速度或横波速度转换为地层的承载力。从理论上讲,由于影响地层承载力的因素较多,这种转换关系是相当复杂的。经过多个勘察项目的实践,总结出了如下经验公式:

$$f_k = aV_R^b h^c \tag{5}$$

式中:  $f_k$  为天然地基容许承载力;  $V_R$  为实测瑞雷波的速度;  $h$  为地层的埋藏深度;  $a$  为常系数;  $b$  和  $c$  为指数参数。

根据沿线钻孔资料和静力触探资料,按式(5)进行标定,也即解多元联立方程,可求得适用于该工区的关系参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ , 得:

$$f_k = 0.14V_R^{1.36} h^{0.01} \tag{6}$$

根据式(6),即可由瑞雷波速度直接近似求取沿线 20 m 深度范围内的各地层容许承载力,并绘制出承载力分布剖面图(如图 3 所示),供设计人员参考。

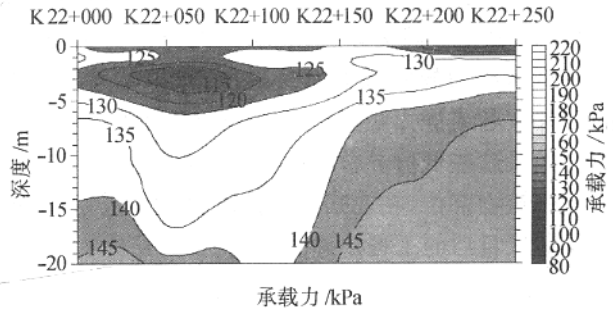


图 3 地层承载力剖面

5 资料对比解释

将通过瞬态瑞雷波法勘探获得的地层承载力剖面,与通过钻孔取芯试验或静力触探试验提取的地层承载力资料进行对比(图 4),二者基本吻合,地层的“软”、“硬”趋势符合得较好。

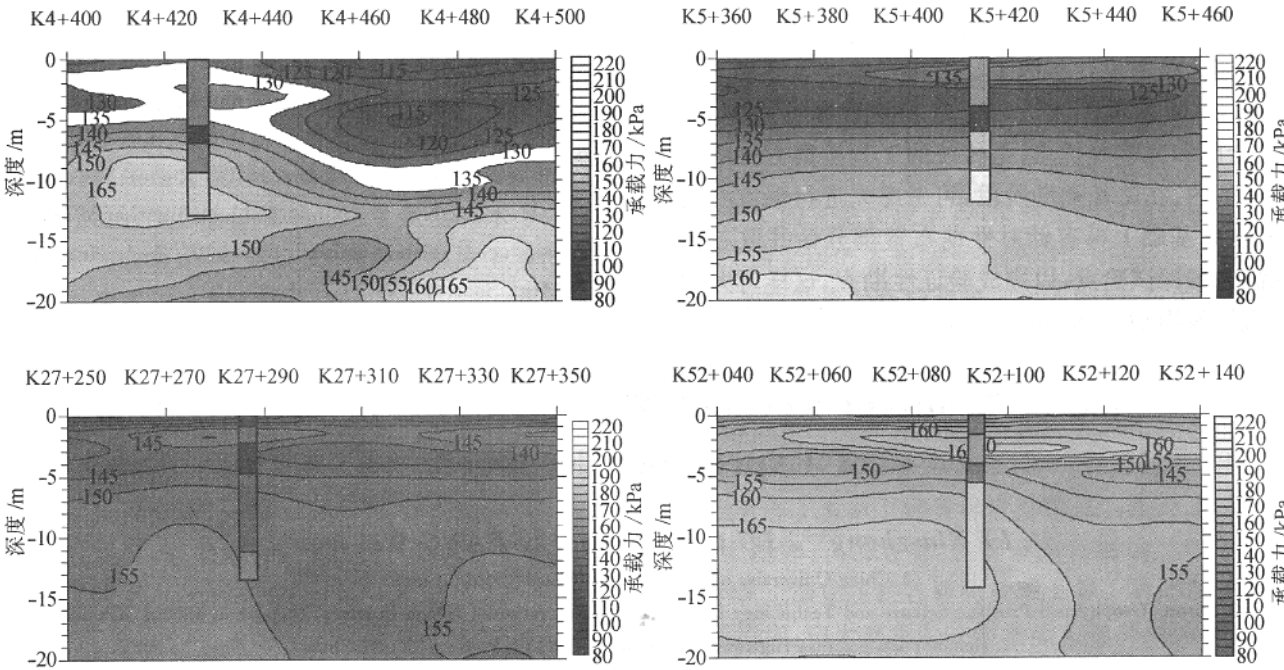


图 4 瑞雷波资料与静力触探资料对比

从图 4 可以看出,由瑞雷波速度根据近似经验公式求取的地层承载力剖面,能较好地反映地层承载力在横向上的变化趋势,但因其加权平均效应使得在纵向上的分辨率较传统方法低,这是该方法本

身所固有的缺陷,从理论上很难完全克服。所以,就目前对瑞雷波法研究的现状来看,纵向分层精度的提高是亟待解决的技术难题。根据瑞雷波法求取的地层承载力剖面,全面反映了该路段地基承载力的

横向分布情况,发现了不少低承载力异常段,如图 3 的 K22+030~K22+090 段,现场地表略微洼陷,而瑞雷波法勘探结果显示地下 1~5 m 有明显的低承载力异常。有关资料表明该处在 20 世纪 70 年代为 1 条灌溉沟,沟宽约 15 m,深约 5 m,后填平。测线与该沟呈约 20° 夹角斜交穿过,低承载力异常得到证实。这些低承载力异常段有时范围很小,单单采用传统的钻井取芯或静力触探等方法进行勘察很容易被漏掉。如果这些低值异常段恰恰位于高填土路段或桥涵等构筑物部位,在勘察和设计阶段被遗漏后,就很容易造成日后的工程隐患。

## 6 结语

(1) 本次瑞雷波法勘探在资料处理时采用  $\tau \sim p$  域与时空域联合提取瑞雷波的方法,使波场分离效果相对于传统的  $f \sim k$  域滤波有了明显的改善,提高了勘探成果的可靠性;采用相邻道法计算频散曲线提高了横向分辨率。勘探成果经与钻孔资料及静力触探资料对比基本吻合,能够较真实地反映沿线地基承载力的连续变化情况,对局部的地质异常体也做出了明确的判断,使工程设计和施工技术人员对沿线地基承载力的分布情况有了一个完整的把握,对高速公路的设计与施工具有很好的指导作用。

(2) 瞬态瑞雷波法用于路基勘察具有高效、低耗、全面和完整等优点,是传统的工程勘察方法所无法具备的。在路基初勘阶段,可考虑先进行瑞雷波勘查,在此基础上再有针对性地对布置部分钻井取芯孔或静力触探试验点,以完成验证性勘查,这样可大大缩短勘察周期,降低勘察成本。

(3) 瞬态瑞雷波法目前仍存在一些难以解决的技术问题,如层速度的计算问题、纵向加权平均效应问题等。为使该方法更加完善、更好地用于工程地质勘察,进一步的深入研究工作是不可少的。但就目前已获得的较高横向分辨率来讲,将该方法用于高速公路路基勘察,并结合少量的钻孔或静力触探试验工作来划分软基路段已基本成熟。相信该方法在高速公路路基勘察领域必将取得较好的经济效益。

## 参考文献:

- [1] 卢成明. 阿深高速公路濮阳段天然地基瑞雷波勘察报告[R]. 2004.
- [2] 杨成林. 瑞雷波勘探[Z]. 1993.
- [3] 王安元. 瞬态面波法在滑坡勘察中的运用[Z]. 2001.
- [4] Yamamoto H, Haldorsen J, Mikada H, Watanabe S. Fracture imaging from sonic reflections and mode conversion. 69th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1999.
- [5] Wu Y, McMechan G A. Estimation of fracture height using microseismicity associated with hydraulic fracturing: Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., 1998.
- [6] Yi W, Nakagawa S, Nihei K T, Rector J W, Myer L R, Cook N G W. Numerical investigation of fracture channel waves. 68th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1998.
- [7] Yi W, Nakagawa S, Nihei K T, Rector J W, Myer L R, Cook N G W. Numerical investigation of fracture-induced seismic anisotropy. 67th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 1997.

# Method of Transient Reyleigh Wave Applied in Investigation of Expressway Roadbed

LI Xiu-zhong<sup>1,2</sup>, LU Cheng-ming<sup>1,2</sup>, FANG Wei-hua<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Lutong Geophysical Prospect Science and Technology Development Corporation of Henan Province, Zhengzhou 450006, China;

3. Henan Yupu Express Highway Depelopment Co. Ltd, Puyang 457000, China)

**Abstract:** The basic theory of transient Reyleigh wave is introduced briefly in this paper. The method of the transient Reyleigh wave applied in investigation of expressway roadbed is introduced systematically through engineering examples of data acquisition in field, processing and interpretation, and then the problems existing in the method are discussed.

**Key words:** soil foundation; bearing capacity of subsoil; transient Reyleigh wave; dispersion curve