

瞬态瑞利面波勘探技术在公路工程勘察中的应用

童立元, 陈征宙, 刘定恩

(南京大学, 南京 210093)

[摘要] 结合工程实例介绍了一种新的勘探技术——瞬态瑞利面波法, 并总结了测试技术要点, 包括测试分析系统、测试条件等, 最后分析了应用效果及应用中的一些问题。

[关键词] 瞬态瑞利面波 分层 液化势

[中图分类号] P642, U412.22 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2000)05-0073-03

随着我国高速公路的发展, 公路建设质量要求越来越高, 这就要求工程设计人员必须充分掌握工勘资料。而公路工勘一般周期短, 跨线长, 经费有限, 故如何合理安排此工作至关重要。考虑到常规勘探手段的局限性, 我们在某高速公路的建设中, 尝试了一种新的勘探技术——瞬态瑞利面波法。

1 工程概况

某高速公路位于苏北地区, 东起连云港的墟沟, 向西经东海、新沂、邳县至徐州的老山口, 是国道主干线连云港至新疆霍尔果斯一级公路的重要路段, 全长约 240 余 km。其中连云港地区广泛分布有淤泥及淤泥质软土, 厚度较大; 而徐州段途经废黄河冲积平原区或古河道, 易液化地基土广泛分布, 主要为亚砂土、亚粘土及饱水粉细砂土等。

2 工作原理

瞬态瑞利面波法, 又称表面波频谱分析法 (Spectral Analysis of Surface Wave)^[1], 以下简称 SASW 法。瞬态瑞利波可用重锤下落或小炸药量爆炸激发, 由垂向检波器接收瑞利波的竖向分量, 根据频谱分析, 可以得到两信号的自功率谱及互功率谱、传递函数和相干函数; 其中, 由相干函数可以对记录信号的各个频率成分的质量作出估计, 只有相干系数大于某一临界值时, 才可认为该频率成分是有意义的, 否则, 就认为是由干扰引起的; 由互功率谱可以得到两信号由于波传播过程中的时间滞后所产生的相位差的关系, 即求得实测的频散曲线, 再由成层地基动力学理论和反分析法可求得剪切波速和深度的关系。计算过程^[2,3,4]简述如下:

设锤击产生的瑞利波经过地面上间距为 x 的

两点 A、B, 记录时域信号分别为 $X(t)$ 、 $Y(t)$, 根据傅氏分析原理, 其频谱分别为

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$S_y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

而 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 的互功率谱为

$$G_{xy}(f) = S_x(f) S_y^*(f) \quad (3)$$

上式: 复数 $G_{xy}(f)$ 的相位表示 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 间的相位差; * 表示共轭运算。对给定的频率 f , 都可用 (3) 式得出相位差 ϕ , 从而求出两点时间滞后

$$t = \frac{\phi}{2\pi} \cdot T = \frac{\phi}{2\pi f} \quad (4)$$

代入公式 $V_r = x/t$, 得与每一频率对应 $V_r = 2\pi f \cdot x / \phi$, 同时由半波长理论可知, 勘探深度 $H = r/2 = V_r/(2f)$, 可推出 V_r-H 关系曲线。实际应用中, 还可由式 (5) 推出剪切波速 V_s (ρ 为泊松比)。

$$V_r = \frac{0.87 + 1.12}{1 + \rho} V_s \quad (5)$$

3 测试系统

3.1 测试分析系统^[4,5]

整个系统如图 1 所示。野外测试时, 在地面沿

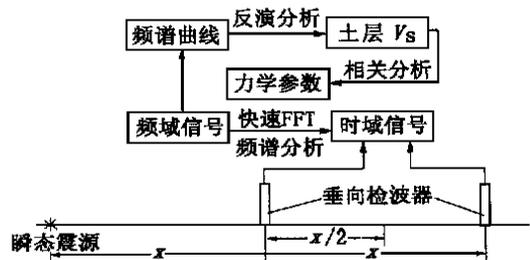


图 1 测试分析系统简图

波的传播方向以一定的道间距 x 布置 N 个检波器,

就可检测到 $(N \cdot x)$ 长度范围内波的传播过程,同时为了获得丰富的地下信息,要求 $r/3 \leq x \leq 2r^{[6]}$ 。

3.2 测试条件

试验采用美国 EG&G 公司生产的 ES - 1225 多道增强型浅层地震仪,震源系统采用 16 磅大锤,人工锤击激发,信息处理采用 SASW 面波分析处理软件。各种测试参数如下:

- (1) 采样率: $31 \mu s \sim 2000 \mu s$, 每次采样 1024 个;
- (2) 道间距: 一般 2 m 左右。如果勘探深度较浅,可采用小间距,如 0.5 m,当深度要求较大时,可适当加大间距,如 3 m ~ 4 m;
- (3) 为减少人动、声波、汽车振动等干扰,采样时要采取滤波措施,勘探深度小于 20 m 时,全通;大于 20 m,低通滤波;
- (4) 增益根据具体情况可调,宜使振幅显示为 3 mm ~ 5mm,以便于通过地震仪屏幕监视信号质量,一般 32 db ~ 36 db;
- (5) 地震仪记录道数为 12 道,可扩充为 24 道,

钻孔柱状图	深度(m)	土类	面波结果(m)	误差(%)
	2.3	黄褐色亚砂土夹粉土	2.17	5.65
	5.0	灰色亚砂土夹粉土	5.09	1.80
	8.0	灰色亚砂土夹细粉砂	8.00	0.00
	10.5	灰绿色粉质亚粘土	11.0	4.76
		黄绿色亚砂土含风化岩屑		

与 2 个或多个检波器相对应,可调控;

(6) 为提高信号的有效性,检波器要求与震源、地震仪频响特性相一致,源点、检波器与地面要有良好的耦合性。

4 测试成果与分析

在徐州试验段,采集了几百张面波记录,并在一些钻孔上作了对比试验,主要有 3 个方面的工作。

4.1 工程地质分层

传统分层方法以钻探为主,但费用高,设备笨重,在现阶段已不大适应高速公路建设的发展,因此一些简便、快捷、经济的物探方法随之发展起来。在高速公路的工程可行性研究和初勘阶段,可采用以物探为主,钻探验证的方法。在该公路徐州某标段尝试了 SASW 法,结果发现该法与钻探结果有良好的对比性,见图 2。另外,还发现 SASW 法对地基中的一些薄层,如厚度 0.5 m 的软弱夹层、淤泥层等也有很高的分辨率,这是其它波速法所不可比拟。

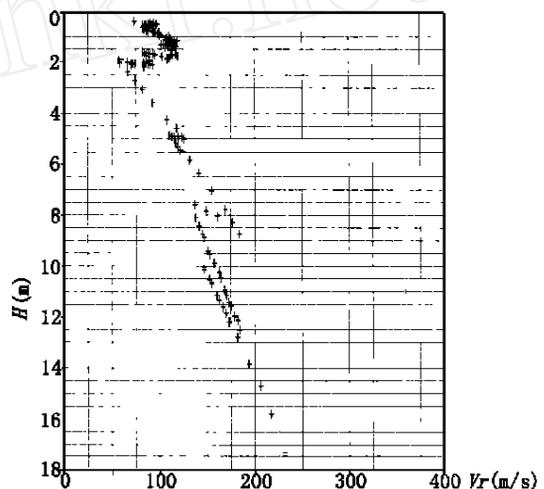


图 2 钻孔法与 SASW 法分层对比图(K218 + 940 - K218 + 980 段)

4.2 地基液化势判别

某公路徐州段普遍存在亚砂土、亚粘土、饱水粉细砂土等可液化地基土,液化势以中等—严重液化

为主。我们应用 SASW 法反推剪切波速 V_s ,用剪切波速法进行液化势判别,并与标贯法判定结果对比,如表 1。很明显,两者结果相一致。

表 1 SASW 法与标贯法判定结果对比(K218 + 940 - K218 + 980 段)

孔号	土号	土类	深度(m)	实测 V_r (m/s)	计算 V_s (m/s)	计算 V_{scr} (m/s)	SASW 法结果	标贯法结果
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	亚砂土夹粉细砂	4.9	57.3	61.7	142.5	严重液化	严重液化

4.3 地基土 V_s 与标贯值 $N_{63.5}$ 相关关系

根据试验区同一位置的 SASW 法及 SPT(即标准贯入试验)测试结果,由 SASW 法测得的剪切波速 V_s 与 SPT 测得的实测标贯击数 $N_{63.5}$ 之间在双对数

坐标下有很好的相关性,见图 3,经拟合其关系为: $V_s = 32.8 N_{63.5}^{0.88}$,相关系数为 $R = 0.8089$,另外该式在地基土经处理后,也得到了证实。为检验该式的可靠性,将其应用于另一区段,结果见表 2,基本上是

可靠的。如果场地工程地质条件不同,则该式系数 应有一变化范围,可通过试验确定。

表 2 面波反算标贯值 $N_{63.5}$ 与实测值对照表

孔号	夯 前			夯 后						
	G1			GG6	GG8		GG16		GG12	
深度 (m)	3.6	6.1	8.0	8.3	4.9	7.6	2.5	5.5	5.3	7.7
土性	粉质亚砂土	粉质亚砂土	亚粘土	亚粘土	粉质亚砂土	亚粘土	粉质亚砂土	粉质亚砂土	粉质亚砂土	亚粘土
计算 V_s (m/s)	146.8	179.4	242.3	195.3	279.1	218.2	286.2	277.2	292.0	239.3
计算 $N_{63.5}$	5	7	10	8	12	9	12	11	12	10
实测 $N_{63.5}$	5	7	11	9	14	8	10	11	14	10
误差 (%)	0	0	9	11	14	12.5	20	0	14	0

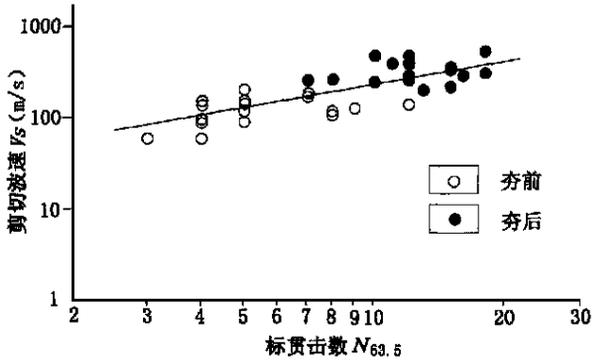


图 3 标贯击数 $N_{63.5}$ 与剪切波速 V_s 相关关系图

5 体会

SASW 法因其在工勘中特有的优点,应用逐渐广泛起来。我们仅仅在某高速公路上作了以上几项工作,而 SASW 法在探测基岩起伏面、地下隐伏洞穴、地基处理效果检测等工作中也有了应用报导。我们就其应用在工勘中的一些情况作一总结。

(1) 因 SASW 法等物探方法的特殊性,现阶段仍不能取代钻探等常规方法,但在工程可行性研究、初勘阶段可适当增加物探量,采取物探为主,钻探验证两者相结合的方法,从而节约资金、时间;

(2) 传统的钻探方法所测信息为点式,而 SASW 法往往在测区布置若干条测线,测试信息为测线下的平均,具有面式特点,如果点面结合,就更易探明

真实地下地质情况;

(3) SASW 法属于原位动态测试方法,与静荷载试验等静态测试技术相结合,可以更好地对地基土的工程动力学性质进行合理评价;

(4) 用 SASW 法进行分层,主要依据地基土的剪切波速,而有时几种土的 V_s 接近,这样就难以具体判定到底为那种土类,这时,最好与钻探结果对比;

(5) SASW 法最适合于高速公路这种大型线性工程,建议在高速公路的工程可行性研究及初勘阶段推广此法;

(6) 因岩土介质的复杂性,SASW 法信息处理方法仍有待提高。

尽管 SASW 法仍有些不足,但作为一种新的勘察技术,必将在工程实践中得到更广泛的应用。

[参考文献]

- [1] 吴世明,陈龙珠.岩土工程波动勘测技术[M].北京:水利电力出版社,1992,89~117.
- [2] 杨成林.瑞雷波勘探[M].北京:地质出版社,1993,1~80.
- [3] 宗孔德,胡广书.数字信号处理[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [4] 张忠苗,等.瞬态面波测试技术在地基处理评价中的应用[J].物探与化探,1992(1):49~54.
- [5] 崔建文,等.瞬态面波勘探技术在工程地质中的应用[J].岩土工程学报,1996(3):35~40.
- [6] 严寿民.瞬态瑞雷波勘探方法[J].物探与化探,1992,16(2):113~119.

THE APPLICATION OF TRANSIENT RAYLEIGH SURFACE WAVE PROSPECTING TECHNIQUE IN ENGINEERING EXPLORATION OF HIGHWAY

TONG Li - yuan, CHEN Zheng - zhou, LIU Din - gen

Abstract: In conjunction with its use in engineering, the paper introduces a new exploration technique — transient Rayleigh surface wave method, and the key technical points of this method is also summarized, including its testing system and conditions. At last, the method's applying effects and some problems are analyzed.

Key words: transient Rayleigh surface wave, division, liquefaction potential



第一作者简介:

童立元(1975年-),男。1997年毕业于中国地质大学(武汉),现于南京大学地球科学系攻读岩土工程专业硕士学位,主要从事城市环境与岩土工程方面的工作。

通讯地址:南京市汉口路22号 南京大学地球科学系97 研研 邮政编码:210093