

PS测井在机场隧道地基勘查中的应用

范伟顺

(山东省第八地质矿产勘查院, 山东日照 276826)

摘要: PS测井技术是地震勘探方法之一,也是一种简便、快速、准确的原位测试技术。该文介绍了单孔法 PS测井的原理及其在铁路工程勘察中的应用,主要包括根据等效剪切波,进行建筑抗震场地类别划分,铁路工程抗震场地类别划分。根据岩土动力学参数,达到评价岩体质量和划分围岩类别目的,利用剪切波速法估算岩土的承载力基本值。通过青岛机场隧道场地的工程实例说明了 PS测井技术在岩土工程勘察设计中的应用情况及应用效果。

关键词: 弹性波测井;等效剪切波速;场地类别;岩土动力学参数

中图分类号: P631.4

文献标识码: B

引文格式: 范伟顺. PS测井在机场隧道地基勘查中的应用[J]. 山东国土资源, 2018, 34(1): 61-64. FAN Weishun. Application of PS Logging in Foundation Survey of Airport Tunnels[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(1): 61-64.

PS测井是P波(纵波 Pressure Wave), S波(横波 Shear Wave)速度测井的简称,亦称波速检层^[1]。是采用先进的电子元件及传感器、计算机信息论、层析成像和数据处理等技术,借助专门的探测仪器设备,将地质信息转换成物理数字信号,然后再把物理信号反演回地质信息的一种技术^[2]。通过岩石物理性质差异,确定场地土类型、建筑场地类别,提供断层破碎带、地层厚度、固结特性和软硬程度,评价岩(土)体质量等;并可计算工程动力学参数,如动剪切模量、动弹性模量等。目前广泛应用于工业与民用建筑、水利水电工程、铁路工程、机场隧道等领域,取得了良好的应用效果。

1 弹性波测试的工作原理

弹性波^[3-6]是应力波的一种,是扰动或外力作用引起的应力和应变在弹性介质中传递的形式。弹性介质中质点间存在着相互作用的弹性力。某一质点因受到扰动或外力的作用而离开平衡位置后,弹性恢复力使该质点发生振动,从而引起周围质点的位移和振动,于是振动就在弹性介质中传播,并伴随有能量的传递。纵波在地质学中称P波,它的传播方向同质点振动方向一致;横波又称畸变波或剪切波,

在地质学中也称为次波或S波。它的传播方向同质点振动方向相垂直,波速小于纵波波速。且岩石破碎对两者传播速度影响不同,横波波速衰减比纵波波速衰减要快,这都是科学应用弹性波速的理论基础。

弹性波测井主要利用测试弹性波速度,计算岩土体的动弹性参数,据此评价岩土体的工程性质,为工程设计提供可靠的科学依据。岩土层剪切波速测试一般采用单孔检层法,即利用单个孔,通过地面激发以产生剪切波,孔内由检波器接收剪切波。当地面震源叩板时,需要水平锤击,可产生剪切波,通过枕木两侧锤击,可生成波相差180度的特性,从而有助于识别S波的初至时间。当重锤垂直叩击铁板时,孔内由检波器可接收P波(图1)。

P波计算公式^[7-15]为:

$$V_{pi} = \frac{1000 \times \Delta H_i}{\frac{H_i}{\sqrt{S^2 + H_i^2}} t_i - \frac{H_{i-1}}{\sqrt{S^2 + H_{i-1}^2}} t_{i-1}}$$

式中: V_{pi} 为第 $i-1$ 点到第 i 点土层的纵波波速(m/s); H_i 为第 i 点深度(m); S 为激震板至孔口距离(m); t_i 为第 i 点纵波初至时间(ms)。

S波计算公式^[7-15]为:

收稿日期: 2017-05-10; 修订日期: 2017-05-24; 编辑: 陶卫卫

作者简介: 范伟顺(1984—),男,山东日照人,工程师,主要从事地球物理勘查工作; E-mail: 815063930@qq.com

$$V_{si} = \frac{1000 \times \Delta H_i}{\frac{H_i}{\sqrt{S^2 + H_i^2}} t'_i - \frac{H_{i-1}}{\sqrt{S^2 + H_{i-1}^2}} t'_{i-1}}$$

式中： V_{si} 为第 $i-1$ 点到第 i 点土层的纵波波速 (m/s)； t'_i 为第 i 点横波的初至时间 (ms)。

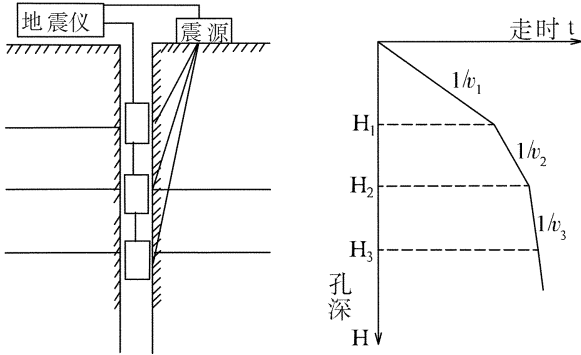


图 1 弹性测井系统示意图

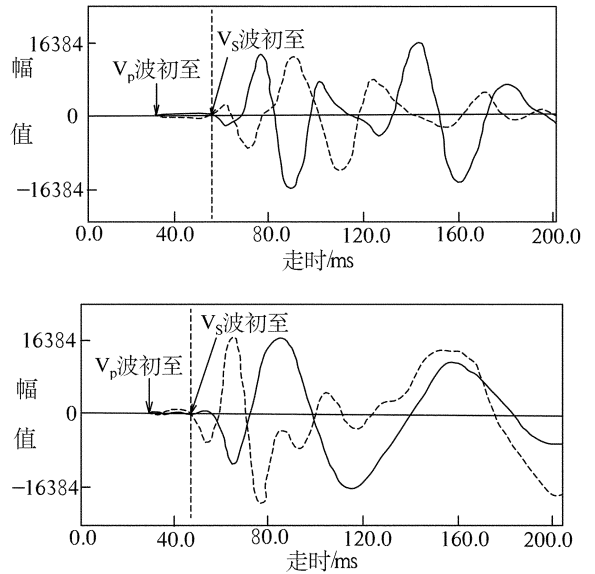


图 2 弹性波初至波形图

2 测试方法及数据采集

木板安置在平整的地面上,使之与地面完全接触。震源板^[16],一般为木板或枕木,宽 300~400 mm,厚 150~300 mm,长 1.8~2.0 m,两端以铁丝箍牢,两端截面宜贴聚胺脂塑料板。孔口至震源板中心距离一般为 2~5 m,震源板两端应与钻孔中心构成等腰三角形,避免震源板倾斜,易造成反向剪切波初至识别误差。压置震源板的重物一般用汽车前轮或汽车钻的液压设备代替,如场地不具备进车条件,可用麻袋装砂土重物方法压置震源板,重物一般为 300~500 kg,不可用木板站人等简易方法叩击剪切波,非特殊因素不能叩击钻机台激发剪切波。重物压重不足,剪切波初至识别困难,会导致解译精度下降。

故数据采集前,应在地面检查场地的环境噪声,注意观察场地周围汽车、火车等震动干扰,应尽量避免各种震动干扰。检查检波器是否正常,一切正常后,方可进行数据采集。深孔、砂层和含铁质地层中工作时,应及时清理检波器上吸附的铁屑,以保证检波器正常工作。工作过程中必须记录钻孔及地层情况(岩土层名称、土的状态、砂的密实度等)、测试日期、工程名称、钻孔编号、钻孔里程、套管深度、仪器工作参数、文件号等,方便解译过程中与实测资料对比(图 2)。

3 工程实例

济青高铁所设计的机场地下隧道,地处青岛胶州市胶东街道,全长 7.25 km,北起汪家庄村,向南依次经过周王庄村、前店口村、二铺村、朱家屯村,南至胶东村,隧道自北向南主要经过在建公路、大沽河支流、拟建青岛新机场、胶济线、胶东镇乡镇道路及龙发热电厂区。隧道剪切波速测试起止里程 DK286+580 左 8 m~DK293+359.8,钻孔起止编号 15-ZD-7102~15-ZD-7139,共 9 个测试孔。岩性主要由 0~1 m 粉质粘土,1~4 m 泥岩(W4),4~12 m 泥岩(W3),12~40 m 泥岩(W3),岩性变化差异性较小。

在测试深孔度内具体可划分为 3 个速度带,即深度 0~6 m 范围内地层剪切波速一般为 240~270 m/s,动剪切模量一般为 0.157~0.164 GPa;深度 5~10 m 范围内地层剪切波速一般为 400~420 m/s,动剪切模量一般为 0.479~0.481 GPa;深度 10~20 m 范围内地层剪切波速一般为 780~860 m/s,动剪切模量一般为 1.459~1.479 GPa。

3.1 场地类别划分

依据中华人民共和国国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 规定,土层的等效剪切波速 V_{se} ^[17],应按下列公式计算:

$$V_{se} = \frac{d_0}{t}$$

式中： V_{se} —场地土层的等效剪切波速度 (m/s)； d_0 —场地评定的计算深度 (m)，取覆盖层厚度 (d_0) 和 20 m 两者的较小值。

$$t = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{si}} \right)$$

式中： t —剪切波由地表到达计算深度处的时间 (ms)； d_i —计算深度范围内第 i 层土的厚度 (m)； n —计算深度范围内土层的分层数； V_{si} —计算深度范围内第 i 层土的剪切波速 (m/s)。

依据中华人民共和国国家行业标准《铁路工程抗震设计规范》等效剪切波按下式^[18]计算：

$$V_{se} = H / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}$$

式中： V_{se} —计算深度内的土层等效剪切波速 (m/s)； H —计算深度 (m)，应取地面或一般冲刷线以下 25 m； h_i —计算深度内第 i 土层的厚度 (m)； V_{si} —第 i 土层的剪切波速 (m/s)； n —计算深度内土层数。

孔 15-ZD-7105 为建筑场地类型评价，依据中华人民共和国国家行业标准《建筑抗震设计规范》GB50011-2010，计算 10 m 以上等效剪切波速为 330.0 m/s，覆盖层厚度大于等于 5 m，场地类别为 II 类。其他孔依据中华人民共和国国家行业标准《铁路工程抗震设计规范》对机场隧道场地类型进行了系统划分 (表 1)。

表 1 8 个孔波速测试场地类型划分汇总

孔号	里程	孔深 (m)	测试深度 (m)	评价深度 (m)	等效剪切波速 (m/s)	场地类别
15-ZD-7111	DK288+351.1	30	26	25	417.5	II
15-ZD-7123	DK290+604.8	45.3	35	25	441.4	II
15-ZD-7125	DK290+984.7	40.3	38	25	693.4	I
15-ZD-7129	DK291+734.7	30	26	25	548.4	I
15-ZD-7134-1	DK292+495.19	40	40	25	887.2	I
15-ZD-7136	DK292+784.3	35	32	25	553.4	I
15-ZD-7139	DK293+359.8	35	30	25	518.6	I
15-ZD-7102	DK286+580	30	29	25	359.6	II

3.2 动泊松比、动弹性模量和动剪切模量换算

以根据外业接收的纵波和剪切波数据，分别计

表 2 各层岩性动力学参数汇总

岩性	H (m)	v_s (m/s) 平均值	v_p (m/s) 平均值	μ_d 变化范围	ρ (g/cm ³)	E_d (MPa) 变化范围	G_d (MPa) 变化范围
粉质粘土层	0~4	219.7	347.16	0.32~0.35	1.92	125.1~380.87	49.28~149.95
全风化泥岩	4~10	411.7	711.3	0.25~0.27	2.32	417.37~1200.45	164.32~480.17
强风化泥岩	10~25	808.6	1326.6	0.21~0.25	2.43	1601.3~4566.98	634~1923.68
弱风化泥岩	25~40	1045.4	1648.1	0.18~0.20	2.46	5151.9~6450.11	1923.6~2779.1
未风化泥岩	40~	2040.7	3356.2	~0.18	2.52	7150.11~	3080.74~

算纵波速、剪切波波速，据此根据下式计算各测点的动泊松比 (μ_d)、动弹性模量 (E_d) 和动剪切模量 (G_d)^[19]。

$$\mu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$$

$$E_d = 2v_s^2 \rho (1 + \mu)$$

$$G_d = \rho \cdot v_s^2$$

式中： μ_d —动泊松比； E_d —动弹性模量； G_d —动剪切模量； v_p —纵波波速 (m/s)； v_s —剪切波波速 (m/s)； ρ —测点处岩土体的密度 (g/cm³)。

根据设计书要求，作为抗震及稳定性评价依据，对所有钻孔进行了粉质粘土层及不同风化程度泥岩的各动弹性参数测定，并完成汇总，测试结果见表 2。

3.3 场地覆盖层厚度确定

一般情况下，应按地面至剪切波速大于 500 m/s 的土层顶面的距离确定 (表 3)。当地面 5 m 以下存在剪切波速大于相邻上层土剪切波速 2.5 倍的土层，且其下层岩土层的剪切波速均不小于 400 m/s 时，可按地面至该土层顶面的距离确定。剪切波速大于 500 m/s 的孤石、透镜体，应视同周围土层。土层中的火山岩硬夹层，应视为刚体，其厚度应从覆盖土层中扣除。

4 PS 测井其他应用

4.1 对岩石破碎程度评价

破碎层^[20]对铁路路基影响较大，钻孔能直接反应断层的存在，但断层的破碎程度需要评价 (表 4)。根据波速测试结果对破碎程度进行评价，具有快速、简洁等优越性。根据纵波速，计算岩石完整系数 $K_v = V_{pm}^2 / V_{pr}^2$ 。由于岩石破碎，横波波速衰减比纵波波速衰减要快，故 K_v 值越大说明岩石破碎程度越大。完整岩石的 V_p / V_s 的参考值约为 1.7^[6]。 n 为岩石孔隙度，即岩石中未被固体物质充填的空间体积 V_p 与岩石总体积 V_b 的比值。

表 3 土的类型划分和剪切波速范围

场地土类型	岩土名称和性状	剪切波速范围(m/s)
岩石或坚硬土	岩石、密实的碎石类土	$V_s > 500$
中硬土	中密、稍密碎石类土, 密实、中密砾、粗、中砂, 基本承载力 $\sigma_0 > 250$ KPa 的黏性土, 粉土和老黄土(Q ₁ , Q ₂)	$250 < V_s \leq 500$
中软土	稍密砾、粗、中砂, 除松散外的粉细砂, 基本承载力 $\sigma_0 \leq 250$ KPa 的黏性土, 粉土和可塑状黄土(Q ₃ , Q ₄), $\sigma_0 > 140$ KPa 的填土	$150 < V_s \leq 250$
软弱土	淤泥和淤泥质土, 松散的砂, 新近沉积的黏性土、粉土和流塑状黄土, 基本承载力 $\sigma_0 < 140$ KPa 的填土	$V_s \leq 150$

表 4 岩石破碎程度评价标准

岩石类别	V_p/V_s	完整系数 K_v	岩石孔隙度 n	岩石破碎程度描述
I	1.7~1.9	>0.75	<15	完整
II	1.9~2.1	0.55~0.75	15~20	较完整
III	2.1~2.5	0.55~0.75	20~30	欠完整
IV	2.5~2.8	0.15~0.35	30~75	较破碎
V	>2.8	<0.15	>75	极破碎

4.2 利用剪切波法估算岩石承载力基本值

通过波速试验可以得到各类地层的厚度和弹性波的传播速度的大小, 直接反应了地层的“软”“硬”程度, 大量的实践验证了剪切波速与承载力值的对应关系(表 5)。

表 5 剪切波速与承载力值对应

V_s (m/s)	R (kPa)	岩土名称
60~80	30~40	淤泥
100~130	70~90	淤泥质软弱土
140~180	90~120	软塑粉质粘土、粉土
200~220	140~160	软塑粉质粘土、稍密中细砂
250~280	180~210	硬塑粉质粘土、中密中粗砂
300~360	240~280	硬塑粉质粘土、密实中粗砂、砾砂软质层全风化
400~450	300~350	密实中粗砾砂、砾砂、全风化岩、硬质岩
>500	>400	强风化层

5 结论

(1)通过以上工程实例说明弹性波测试技术, 在铁路工程、机场隧道等工程勘察领域有着广泛的应用, 能够为工程建设提供有效的技术支持。弹性波测井具有简洁、快速、高效的特点, 随电子技术发展, 解译精度的提高, 必将为工程设计、施工提供更精确的参数和可靠的依据, 也预示这在工程勘察领域有更广阔的应用前景。

(2)弹性波在岩(土)层中的传播速度是反映岩(土)体的动力特性的一项重要参数, 通过 PS 测井获取弹性波速, 能够为抗震设计提供岩(土)体的动

力参数、划分铁路工程场地类别、划分建筑场地类别、岩石破碎程度评价和大致估算岩土承载力等。

(3)需要强调的是, 仅仅采用弹性波测井所获取得参数 $V_s, V_p, V_p/V_s, I, \mu_d, G_d, n$ 等参数, 评价岩层、岩石破碎程度等是欠妥当的, 应结合工程资料综合使用。因地下岩层实际情况往往是复杂的、多变的, 大多数情况是相互叠加的。

参考文献:

[1] (前苏联)尼基金 BH.工程地震勘探原理[M].北京:科学出版社,1993:985-996.

[2] 朱利超,刘文国,张绪朋,等.二级坝泵站工程范围内变形监测网布设与观测[J].山东国土资源,2016,32(5):83-85.

[3] 丁伯阳,刘卫平,陶海冰.泥浆护壁孔中剪切波速直接测试[J].工程勘察,2003,(3):67-69.

[4] 曾爱平,孙立新,杜贤军.地震勘探中多次反射折射波的影响分析及应对措施——以滕县煤田某煤矿地震勘探为例[J].山东国土资源,2017,33(1):71-75.

[5] 金衍,陈勉,张旭东.利用测井资料预测深部地层岩石断裂韧性[J].岩石力学与工程学报,2001,20(4):454-456.

[6] 丁伯阳.土层波速与地表脉动[M].兰州:兰州大学出版社,1995:264-340.

[7] 丰莉,王石,郭文建.测井技术在泰安姚庄油页岩勘探中的识别应用[J].山东国土资源,2016,32(5):75-78.

[8] 肖柏勋.工程地球物理学进展[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,2000:17-22.

[9] 林英松,葛洪魁,王顺员.岩石动静力学参数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,1998,7(2):215-222.

[10] 许忆.基于塑性力学极限法的赵树岭滑坡稳定性分析[J].山东国土资源,2016,32(10):75-78.

[11] 尤明庆.岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):53-60.

[12] 刘正刚,李宏泉,申旺.PS测井技术在九嶷山隧道勘察中的应用[J].2011,12(2):67-69

[13] 许崇宝,王晶,曾爱平.地震勘探技术在煤炭勘查中的应用与展望[J].山东国土资源,2016,32(1):1-8.

[14] 陈蜀俊,段向东,罗登贵,等.弹性波测井在三峡库岸地层评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,(17):2907-2942.

- [15] 沙礼,隆威.弹性波速测井技术在岩土工程地质勘察中的分析与应用[J].四川建材,2009,(3):175-176.
- [16] QJ/WZ001-2008.铁道第三勘察设计院集团有限公司标准剪切波速测试暂行规定[S].
- [17] GB50011-2010.建筑抗震设计规范[S].
- [18] GB50111-2006.铁路工程抗震设计规范[S].
- [19] 刘兴金.二维地震勘探在新疆准东煤田梧桐窝子煤矿区煤层对比中的应用[J].山东国土资源,2016,32(2):70-72.
- [20] 李彬,刘冬生,姜文娟,等.居民区附近崩塌地质灾害隐患点工程设计与实现——莱阳市沐浴店镇簸箕港村东南隐患点[J].山东国土资源,2016,32(9):48-51.

Application of PS Logging in Foundation Survey of Airport Tunnels

FAN Weishun

(No.8 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Rizhao 276826, China)

Abstract: PS logging technology is one of the seismic exploration methods. It is also a simple, fast and accurate situ testing technology. In this paper, the principle of single hole method PS logging and its application in railway engineering survey have been studied, including the construction of seismic site classification and seismic classification in railway engineering according to the equivalent shear wave. According to dynamic parameters of rock and soil, rock mass quality has been evaluated and the surrounding rock has been classified. The basic value of bearing capacity of rock and soil has been estimated by using shear wave velocity method. The application effect of PS logging technology in geotechnical engineering survey and design has been illustrated through the engineering example of Qingdao airport tunnel site.

Key words: Elastic wave logging; equivalent shear wave velocity; site classification; geotechnical dynamics parameters