

波速测试在工程勘察中的应用效果

蔡力挺, 韩玉庆

(山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264003)

摘要:通过波速测试可获得岩土体的弹性波速,为工程建筑设计提供科学依据。在简述单孔检层法工作原理及方法基础上,以工程实例说明了波速测试技术不但可为建筑抗震设计提供所需的岩体动力参数,而且可利用岩石的纵波波速比定量地进行岩石风化程度划分和岩体动力特性评价。

关键词:单孔检层法;波速测试技术;动弹性力学参数;岩(土)体

中图分类号:P315.9;TU431

文献标识码:A

0 引言

近几年,随着我国各项建设事业步伐的加快,岩土工程勘察受到越来越广泛的重视和应用,作为岩土原位测试技术之一的波速测试技术也得以应用和发展,目前已广泛应用于工业与民用建筑、水利水电工程、路桥工程、油气、码头等众多岩土工程地质勘察领域,并取得了良好的应用效果。

地震波根据其波动位置和形式可分为体波和面波,其中体波根据其质点振动方向与波传播方向的不同又分为纵波(P波)和横波(S波)。而波速测试便是原位测定压缩波(P波)、剪切波(S波)在岩(土)体中的传播速度,避免室内测试所带来的误差,它能有效地解决许多地质问题,诸如确定场地土类型、建筑场地类别;提供断层破碎带、估算场地卓越周期及场地土的承载力、评价岩(土)体质量等;可计算工程动力学参数,如动剪切模量、动弹性模量等,为场地工程地质评价和工程建筑设计提供科学依据。

1 工作原理

波速测试技术是一种简捷、快速、准确的岩土原位测试技术,一般采用单孔检层法,实测常采用地表激发孔中接收法,即地面激发以产生弹性波,孔内由

检波器接收弹性波(图1),此时测得的剪切波为横波(S波)的一种水平分量(即Sh波),其传播速度与S波相等,故常用测定Sh波的方法来确定S波的传播速度^[1]。当地面震源采用叩板水平正反向激发时,产生Sh波,利用剪切波震相差1800的特性来识别Sh波的初至时间,垂向激发产生P波(图1)。根据公式(1)(2)可计算出剪切波速 V_s 和压缩波速 V_p 值^[2]。

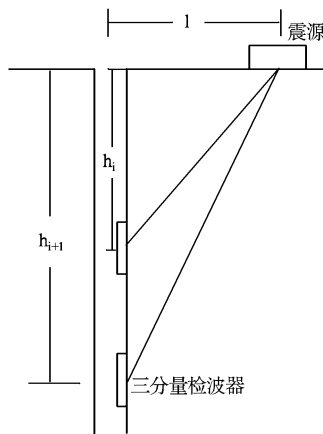


图1 单孔检层法波速测试示意图

$$V_{is} = \frac{\sqrt{(h_{i+1}^2 + l^2)} - \sqrt{(h_i^2 + l^2)}}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

$$V_{ip} = \frac{h_{i+1} - h_i}{tp_{i+1} - tp_i} \quad (2)$$

* 收稿日期:2008-02-25;修订日期:2008-06-17;编辑:陶卫卫

作者简介:蔡力挺(1972-),男,河南太康人,工程师,主要从事工程及矿产物探工作。

式中： h_i, h_{i+1} 为测试点 $i, i+1$ 至孔口的垂直距离； l 为板中心到孔口的水平距离； t_i, t_{i+1} 为剪切波在2个不同深度时的走时； tp_i, tp_{i+1} 为纵波在2个不同深度的走时。

2 测试方法

现场测试时选择平整场地，将长约 2.5 m、宽约 0.3 m、厚约 0.1 m 的激振板置于距井口 1.5 m 左右，且使木板中垂线通过井口中心，压上约 500 ~ 1000 kg 的重物，使木板与地面紧密接触，以获得良好的测试效果。分别敲击木板两端以获得 3 次清晰 S 波形为止，然后垂直敲击置于井口一侧的铁板激发 P 波，测试点距视岩土分层厚度而定（一般为 2 ~ 3m）。记录仪由井中三分量检波器和工程地震仪构成，三分量检波器置于孔中一定深度，接收由震源产生的弹性波信号，并通过连接电缆传输给地震仪，再

由地震仪记录并储存以备后期数据处理^[3]。

3 应用效果

3.1 利用波速估算场地的卓越周期

烟台大华上海滩建设项目：位于烟台市莱山区于家滩村，它集商贸、住宅、休闲、娱乐等于一体的多功能高层建筑，是烟台市的重点建设项目。地貌上属于山前冲积相的平地，工程场地地层自上而下依次为：素填土、粉砂、粉质黏土、细砂、粉质黏土、碎石层、强风化云母片岩。由于该项目为烟台市 2006 年的重点建设项目，出于抗震设计考虑，要求用波速测试法判别该场地土类型、场地类别以及用波速估算场地的卓越周期。该次采用次波速测试单孔检层法，共做 ZK1#孔和 ZK2#孔 2 孔波速测试（图 2）。

ZK1#孔 岩土名称	层底 深度 (m)	测试 深度 (m)	初至时间 (ms)	V_s (m/s)	\bar{V}_s (m/s)	动剪模量 (Gd)(MPa)	质量 密度 ρ (g/cm ³)	波速曲线(m/s)					
								100	200	300	400	500	600
素填土	1.8	1	14.78	107	188								
		2	17.63	268									
粉砂	3.8	3	26.58	100	99	0.0167	1.7						
		4	36.20	98									
		4.8	40.06	250									
细砂	6.0	5	43.80	261	261	0.1158	1.7						
		6	43.80	261									
粉质黏土	13.0	7	48.74	199	255	0.1040	1.6						
		8	51.86	316									
		9	54.67	352									
		10	57.88	309									
		11	61.59	268									
		12	67.80	160									
		13	73.30	181									
碎石	16.5	14	76.20	343	389	0.2724	1.8						
		15	78.71	398									
		16	81.01	433									
		17	83.61	383									
		18	86.22	383									
强风化 云母片岩		19	88.52	434	578	0.6691	2.4						
		20	90.32	553									
		21	92.03	585									
		22	93.49	684									
		23	93.49	684									

ZK2#孔 岩土名称	层底 深度 (m)	测试 深度 (m)	初至时间 (ms)	V_s (m/s)	\bar{V}_s (m/s)	动剪模量 (Gd)(MPa)	质量 密度 ρ (g/cm ³)	波速曲线(m/s)					
								100	200	300	400	500	600
素填土	0.8	1	11.29	140	140								
粉砂	2.2	2	19.09	98	98	0.0163	1.7						
粉质 黏土	4.0	3	26.21	119	123	0.0242	1.6						
		4	34.04	127									
细砂	6.2	5	39.49	177	163	0.0452	1.7						
		6	46.08	148									
粉质 黏土	10.0	7	49.06	279	241	0.0929	1.6						
		8	53.77	237									
		9	58.27	220									
		10	62.65	226									
碎石	17.0	11	65.86	310	378	0.2572	1.8						
		12	68.46	382									
		13	71.23	359									
		14	73.92	370									
		15	76.36	409									
		16	79.03	373									
		17	81.30	441									
强风化 云母片岩		18	83.22	517	611	1.0486	2.4						
		19	85.02	556									
		20	86.77	570									
		21	88.28	662									
		22	89.85	634									
		23	91.23	726									

图 2 烟台大华上海滩工程 ZK1#, ZK2#孔波速测试成果

根据《建筑抗震设计规范》(GB5001—2001)，确定建筑的场地类别^[4]，判定结果如下：ZK1#孔和 ZK2#孔的等效剪切波速分别为 234 m/s, 210 m/s；覆盖层厚度分别为 19 m, 17 m，由此可得出该场地土

类型为中软土、场地类别为 II。用 $T = 4 \times H/V_{se}$ (式中 T 为卓越周期； V_{se} 为相应孔的等效剪切波速； H 为覆盖层厚度，当 $H > 20$ m 时取 20 m) 估算场地的卓越周期分别为 $T = 4 \times 19/234 = 0.3248S$, $T = 4 \times$

17/210=0.3238S,与用地脉动法直接观测结果相一致。通过大量实践证明,该方法是一种快速有效的确定工程场地卓越周期的方法,通过对比,证明其结果与地脉动法直接观测结果较一致。由于地脉动法测试场地卓越周期对测试条件要求较严,如需在夜深人静时观测,测试点远离建筑,场地内无游散电流干扰,无机器振动干扰,特别在城市中测试,这些条件很难做到,这样用 $T = 4 \times H/V_{se}$ 代替地脉动法求出场地卓越周期显得尤为重要。

3.2 利用波速法计算岩土的动力参数

根据实测获得的弹性波速(V_s 和 V_p),即可计算岩(土)体的动弹性力学参数,为岩土工程质量提供评价依据和工程设计提供参考。计算公式如下:

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (4)$$

$$E_d = 2\rho V_s^2(1 + \mu) \quad (5)$$

表1 烟台红旗路师院隧道工程32#孔各层岩石动弹性参数

岩土名称	测试深度 (m)	V_s 平均 (m/s)	V_p 平均 (m/s)	E_d (GPa)	G_d (GPa)	K_d (GPa)	λ_d	μ_d	ρ (g/cm ³)
全风化云母片	2.5	328	687	0.5820	0.2152	0.6570	0.5136	0.3524	2.0
强风化云母片	13.0	655	1236	2.6869	1.0297	2.2936	1.6072	0.3047	2.4
中风化云母片	20.0	1311	2480	11.6730	4.4687	10.0328	7.0537	0.3061	2.6
微风化云母片	25.0	1730	3200	21.6795	8.3801	17.4985	11.9117	0.2935	2.8
未风化云母片	32.0	1974	3570	27.9271	10.9107	21.1381	13.8643	0.2798	2.8

3.3 利用剪切波速法估算岩土的承载力基本值

结合烟台地区的工程勘察资料并根据大量工程实践,得出烟台地区岩土的剪切波速值 V_s 与其对应的承载力基本值 R (t/m²)的关系(表2),可供工程技术人员快速判断和预估岩土的承载力基本值,了解岩土的性状和质量,指导生产工作。

表2 烟台地区岩土的剪切波速值与其对应的承载力基本值

V_s (m/s)	R (t/m ²)	备注
60~80	3~4	一般为流塑状淤泥
100~130	6~8	为软塑淤泥质土或砂、松散填土
140~180	9~12	可塑的土、松散的砂
200~220	14~16	可塑的土、稍密的砂
250~280	18~22	硬塑的土、中密的砂、全风化软质岩
300~360	24~28	硬塑的土、密实的砂、全风化岩
400~450	30~35	密实的角砾、卵砾等、全风化的硬质岩、上部强风化软质岩
>500	>40	密实的卵砾、块石、漂石、强风化岩
550~600	45~50	强风化岩

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (6)$$

$$K_d = \rho \left[\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{3} \right] \quad (7)$$

$$\lambda_d = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \quad (8)$$

式中: ρ —介质密度(g/cm³); V_p —压缩波速度(m/s); V_s —剪切波速度(m/s); μ_d —泊松比; E_d —动弹性模量(KPa); G_d —动剪切模量或动刚性模量(KPa); K_d —动体变模量(KPa); λ_d —动拉梅系数(KPa)。

根据地区经验系数,可由动弹性参数换算为静弹性参数,为岩土工程质量评价和工程设计提供更加准确的参考数据,也可使工程工作由繁入简,减少成本和工作量。如烟台市2004年的重点建设项目烟台红旗路师院隧道工程,工程勘察由烟台建筑设计研究院承担,为抗震设计及工程稳定性考虑,特委托山东省第三地质矿产勘查院用波速法测定隧道选址处的云母片岩的各动弹性参数,其中32#孔测试结果见表1。

3.4 砂性土地震液化势判别

按地震基本烈度VII度考虑,对场地15m深度范围内的砂性土层依据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)标准进行判定^[5],当砂性土层的剪切波速度实测值大于由式(9)所计算的临界剪切波速度时,则判定该砂性土层不液化。

$$V_{scr} = V_{s0} \sqrt{d_s - 0.0133d_s^2} \times (1 - 0.185 \frac{d_w}{d_s} \times \sqrt{\frac{3}{\rho_c}}) \quad (9)$$

式中: V_{scr} —剪切波速度临界值(m/s); V_{s0} —与烈度、土类有关的经验系数(砂: $V_{s0} = 65$ m/s;砂壤土: $V_{s0} = 45$ m/s); d_s —剪切波速度测点深度(m); d_w —地下水深度(m),该测区 $d_w = 3$ m; ρ_c —粘粒含量百分率,当小于3或为砂土时,采用3。

烟台火车站北临黄海,地貌上属于山前冲积加海积相的平地。烟台火车站改造改建项目,工程场地地层自上而下依次为:素填土、粉砂、粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、强风化云母片岩。由于该项目

为公共事业建筑,作为抗震设计考虑,应设计单位的委托,要求在波速测试的同时判别该场地粉砂、粉土层在设计地震烈度为Ⅶ度时是否有液化可能。

根据公式(9)判定标准对烟台火车站站房项目地基砂性土层进行判别(表3)。

表3 烟台火车站站房项目地基砂性土剪切波速度统计

孔号	孔深(m)	岩性	剪切波速度(m/s)		液化势判别
			实测值 V_s	临界值 V_{scr}	
Z2-17 [#]	5.0~8.7	粉砂	107~176	136~145	部分液化
	8.7~10.5	粉土	256	195~217	不液化
Z2-23 [#]	4.0~7.0	粉砂	133~256	136~147	部分液化
	7.0~9.0	粉土	219~288	180~223	不液化

注:Z2-17[#],Z2-23[#]两孔深20m范围内地层岩性均为黏土和粉质黏土,故不做液化判别。

由表1可知,在深度15m范围内,粉砂层剪切波速度实测值均部分小于相应剪切波速度临界值,初判为部分液化土层;粉土层剪切波速度实测值均大于相应剪切波速度临界值,初判为不液化土层。

4 测试中应注意的事项

波速测试虽然简便,但要测试准确应注意以下事项:①信号质量和测试深度准确是关键,二者直接影响着初至时间的读取。获得较好的信号可采用增强或叠加技术,选取合理的增益和带通滤波。②正确识别S波、P波。P波传播速度较S波速度快,P波为初至波;在激振板两端水平激发时,S波相位反

向,而P波相位不变;在距井口一定深度后,P波振幅变小,频率变高,而S波幅度相对较大,频率相对较低。③最小测试深度应大于震源板至孔口之间的距离,以避免浅部高速地层界面可能造成的折射波影响。当场地被混凝土、沥青等硬化后,可在激振板下面均匀地铺一层中细砂或粉土,亦可取得较好的测试效果。

5 结论

通过工程实例说明了波速测试在岩土工程勘察中应用是科学有效的,不但可为建筑抗震设计提供所需的岩(土)体动力参数、划分建筑场地类别、评价地震效应、地震破坏潜势分析,而且可利用岩石的纵波波速比定量地划分岩石的风化程度、利用处理前后 V_s 的变化检测软土地基加固效果、地基振动特性研究和爆破区岩体动力特性评价等诸多问题。

参考文献:

- [1] 丁伯阳. 土层波速与地表脉动[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1996, 207-246.
- [2] 刘康和. P. S测井技术的工程应用[J]. 华北地震科学, 2001, 19(1): 18-22.
- [3] 张宗岭. 工程地震原理与方法[M]. 北京:中南工业大学出版社, 1994, 9.
- [4] GB50011—2001. 建筑抗震设计规范[S].
- [5] GB50021—2001. 岩土工程勘察规范[S].

Application Effect of Velocity Test in Engineering Investigation

CAI Li-ting, HAN Yu-qing

(No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Yantai 264003, China)

Abstract: The elastic wave velocity technology is a simple, rapid and accurate testing technology for determining rock location. It will provide a scientific basis for architectural design. The mechanism and method of determining strata by single hole method are introduced in this paper. By using engineering examples, it is showed that this test technology will not only provide the necessary impetus rock parameters, but also can classify the weathering degree of rock quantitatively by using longitudinal wave speed ratio.

Key words: Velocity test; dynamic elastic parameters; application efficiency; attention