

波速测试在高层建筑地基勘察中的应用

王 俊 茹

(石家庄经济学院 ,河北 石家庄 050031)

摘要 :阐述了波速法确定地层物理力学参数及地基固有周期的方法 ,并以河北信访局综合办公大楼的地基勘察为例 ,阐述了波速资料在高层建筑地基勘察中的应用。
关键词 :波速测试 地基勘察 岩土物理力学参数 地基固有振动周期
中图分类号 :P631.4 ;TU4 文献标识码 :A 文章编号 :1000-8918(2000)03-0219-06

随着对土层弹性波性质的深入了解 ,人们认识到对于软弱土层和完整性较差的岩体 ,采用取样和室内试验方法不仅繁琐 ,而且测试精度也难以保证。目前 ,以分辨率高著称的波速测试法成为测定地层动力参数的一条简便有效的途径。它通过测定地层波速来达到解决地层性质的目地。波速测试的方法常用的是跨孔法和单孔检层法。波速测试资料不仅用于地层划分、地下水位和地下洞穴的勘察 ,而且利用下到井中的三分量检波器能同时得到纵波和横波速度的优势。波速测试成为高层建筑地基勘察中必不可少的原位测试方法 ,用这种方法可以测定地层的物理力学参数 ,如测定地层的弹性模量、泊松比、孔隙率、评价饱和土层的液化势和确定成层地基的固有周期等工程地质问题。

1 波速测试法确定岩土物理力学参数

在地基和建筑物的地震反应分析中 ,需要预先确定地基的动力参数。对弹性状态下的地层 ,其性质参数主要是剪切模量 μ 、弹性模量 E 及泊松比 σ 。

1.1 波速法确定地层弹性模量和剪切模量

弹性模量是表征弹性体性质的参数。由于不同类型岩土的物理性质不同 ,地震波在其中的传播速度、强度等参数也不相同 ,地震波速还受多种因素的影响 ,如风化程度、裂隙、孔隙度、破碎程度及地层各向异性等 ,因此由波速求出的弹性模量能够反映岩土的物理力学性质。波速测试正是利用这个基本原理来测定分析岩土的工程力学指标。

由波动方程导出的弹性模量 E 与纵波速度 v_P 及横波速度 v_S 的关系如下式所示

$$E = \frac{\rho v^2 (3 v_P^2 - 4 v_S^2)}{v_P^2 - v_S^2}; \tag{1}$$

$$\mu = \rho v_S^2. \tag{2}$$

式中 ρ 为地层介质的质量密度。由于气体和液体内部的 $\mu = 0$,由(2)式可见 ,横波不能在液体和气体中传播。因此 ,随着土体饱和度的增加 ,纵波速度受土骨架影响减小。由(1)式求出的弹性模量便不易反映土体的性状。由于土中横波特性不受水含量的影响 ,因此 ,高饱和度土

层的动力参数的测定多采用横波速度 v_s 和 $\mu = \rho v_s$ 来划分地层及确定土层性质。

1.2 波速测试确定地层泊松比

泊松比是反映土体变形特性的一个重要参数。在简单的拉伸(或挤压)应力的作用下,把物体的横向应变与纵向应变之比称为泊松比。由实测波速来确定泊松比的方法称为动力法,由动力法只能测定土体的弹性泊松比。由波动方程推出的泊松比 σ 与 v_p 和 v_s 的关系如下

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3)$$

介质的泊松比值都在 $0 \sim 0.5$ 之间变化,流体的泊松比值为 0.5 ;未胶结的软沉积物的泊松比值达 0.45 ;大多数岩石的泊松比在 0.25 左右,极坚硬的刚性岩石泊松比值减小到 0.05 ;均匀土层泊松比随深度的增大而逐渐增大,这主要因为土的饱和度随深度的增大而增大。

2 波速测试法确定地基固有振动周期

大量统计资料表明,如果某一地震波的卓越周期与建筑物的固有周期一致,则建筑物就会由于共振产生大幅度的摇晃,因此掌握建筑物的振动特性对于抗震防灾是一项很重要的工作。建筑物的振动特性与建筑物的构造和地基的构造有关。大量试验资料表明,地震卓越周期对每种地基是个常数,其值相当于地基的固有周期。就功率谱而言,冲积砂土的卓越频率较高,冲积粘土的卓越频率较低,呈现地基越软弱,卓越频率越低的倾向。地基固有周期的确定方法可通过波速测试或常时微动。采用波速测试法计算地基固有周期,有机械阻抗法、瑞雷波法、加权平均波速法及子层周期求和法。下面仅介绍 2 种简单而常用的方法。

2.1 子层周期求和法

子层周期求和法的计算式为

$$T_g = 4 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_{Si}} \quad (4)$$

式中 h_i 为第 i 层地层厚度,单位 m ; v_{Si} 为第 i 层地层横波速度,单位 m/s ; n 表示土层数。

2.2 加权平均波速法

加权平均波速法的计算公式为

$$T_g = 4H/\bar{v}_s \quad (5)$$

式中 $\bar{v}_s$ 为各层土横波速度的加权平均值,即

$$\bar{v}_s = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n h_i v_{Si}; H = \sum_{i=1}^n h_i$$

3 波速资料在地基勘察中的应用

波速值和弹性参数广泛应用于工程勘测的各个领域,特别在地基勘察中的应用日益广泛。下面以河北信访局办公大楼的地基勘察为例,介绍波速资料在高层建筑地基勘察中的应用。

3.1 工程地质概况

河北信访局拟在石家庄市桥西区维明街东侧建 17 层高约 $60 m$ 的办公大楼。该场地地处太行山山前冲洪积平原,地层为冲洪积形成的粘性土、粉土、砂类及砂混卵石类土等。根据钻孔揭露,表层 $0.5 \sim 1.6 m$ 为人工填土, $7.0 \sim 10.0 m$ 处分布细砂—中砂, $18 m$ 以下为中砂—粗砂(含卵石)层,其余主要为粉土、粉质粘土层。地下水位约为 $35 m$ 。

3.2 波速资料的采集

为对场地进行类别划分及对地基特性进行评价,在拟建建筑物基础宽度端部布置了 2 个 35 m 深的钻孔,即 7 号和 1B 号。采用单孔检层法按地层逐层测试,使用重庆产 DZQ12-1 波速测试仪,将三分量检波器放至孔底后,自底部向上依地层界面测试,用气筒充气固定检波器,使其紧贴孔壁。震源采用击板法,将长 2~3 m,宽 0.3 m,厚 0.5 m 的激振板放在离孔口 2 m 处的地面上,木板上压一定量的重物(本次采用将汽车前轮压在木板上),使其与地面接触良好,用铁锤水平敲击木板两端,使地层产生剪切波,传至井中检波器,剪切波和纵波速度由孔口至检波器距离和走时求得。表 1 是 1B 号钻孔测出的地层的剪切波速度和纵波速度,并将其分别代入(1)式和(2)式计算出地层的动弹性模量 E 和动剪切模量 μ ,将其值代入(3)式可得到各地层的泊松比。

表 1 1B 号钻孔弹性波测试成果表

深度/m	地层描述	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	v_p/v_s	σ	μ/MPa	E/MPa
0~2	杂填土、粉粘	108	210	1.94	0.32	22	60
2~4	粉土	133	260	1.95	0.35	34	93
4~5	粉质粘土	167	335	2.00	0.33	54	144
5~7	粉土	198	400	2.00	0.33	76	203
7~9	中砂	276	510	1.85	0.29	144	371
9~10	中砂	298	550	1.85	0.29	167	433
10~13	粉质粘土	286	550	1.92	0.31	158	416
13~15	粉土	295	565	1.92	0.31	168	442
15~18	粉质粘土	308	605	1.96	0.32	184	487
18~20	中砂	333	630	1.89	0.30	209	546
20~22	中砂	375	710	1.89	0.30	265	693
22~24	中砂	390	750	1.92	0.31	287	754

3.3 应用波速资料划分场地类别

划分场地土类别是测试剪切波速度最主要的用途。根据《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)的规定,甲、乙类建筑场地必须按照实测地层波速值划分场地土的类型,通常做法是取地面下 15 m,且不深于场地覆盖层厚度内各土层剪切波波速,按土层厚度加权的平均值 v_{sm} ,根据 v_{sm} 值将场地划分为坚硬场地土($v_{sm}>500\text{ m/s}$);中硬场地土($500\text{ m/s}\geq v_{sm}>250\text{ m/s}$);中软场地土($250\text{ m/s}\geq v_{sm}>140\text{ m/s}$)和软弱场地土($v_{sm}\leq 140\text{ m/s}$) 4 种类型,然后结合覆盖层厚度来划分场地类别。根据《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)第 3.1.2 条规定,经对本场地钻孔弹性波速测试资料的统计分析,在地表下 15 m 深度内计算出的地基土的剪切波波速的加权平均值 v_{sm} 为 194~226 m,故本工程场地土属中软场地土。按第 3.1.5 条规定,场地覆盖层厚度 $9<d_{ov}<80\text{ m}$,故场地类别为二类。

3.4 应用波速资料划分岩土性质

应用纵波和横波两者的波速比(v_p/v_s)可粗略划分岩土的特性,查找基岩断层位置和产状及破碎带的分布范围。如波速比是 1.7 左右,而纵波 v_p 值高,说明是未风化的基岩,若 v_p 值低,主要表示砂或卵石; v_p 值低,而 v_p/v_s 高,表示经常在水位以上的粘性土壤; 岩土的 v_p 接近水的波速(1 450 m/s),而 v_p/v_s 值高时,可能代表水位以下的软粘土。也可通过计算出的泊松比来评价岩土质量,如 $\sigma=0.25$ 左右,岩石质量较好, $\sigma=0.35$ 时,说明岩石已被风化的接近土壤了。本工程中测定的大部分地层的波松比 $\sigma=0.30\sim0.35$,仅在 7~10 m 处砂的

泊松比 $\sigma=0.29$,因此可作为建筑基础底面。如 4~7 m 处的纵波速度 v_P 值低 ,而 v_P/v_S 高 ,正好与水位以上的粉质粘土对应。

3.5 波速资料在建筑抗震设计中的应用

根据钻孔揭露的本工程地质情况 ,土层水平成层且比较均匀 ,经对 1B 号钻孔所揭露的地层 ,用子层周期求和法计算出地基的固有周期列于表 2。根据表 2 建筑基础底面深度为 10 m 处的固有周期 $T_g=0.241$ s。本工程在地表及地表下 10 m 进行了常时微动同步观测 ,测试次数为 4 次 ,获得的卓越周期在水平方向及垂直方向均为 0.307 s ,将波速法计算的固有周期与常时微动做比较 ,其相对误差为 21.5 %。地基固有周期的计算精度主要取决于测试横波速度的精度 ,地层既厚又简单 ,卓越周期越短时 ,波速法计算结果与常时微动实测值越接近。根据波速法计算的固有周期值 ,对地基进行分类可以有不同的分类标准 ,分类是供抗震设计计算核定有关参数用的。根据表 3 的分类标准 ,河北信访局办公大楼地基类别为 II 类。本建筑物的拟建高度 $H=60$ m ,如果按 $T_b=0.03H$ 的公式估算建筑物的固有周期 T_b 为 1.8 s ,与地基土的固有周期做比较有一定差值。因此在地震基本裂度为 7 度的情况下 ,建筑物不致因共振而被破坏。显然地基固有周期可作为建筑抗震设计的基本依据。在基础设计中 ,为解决建筑物抗震问题 ,应适当地选择持力层 ,有选择地确定基础结构及埋深 ,加大建筑物基础及整体刚度 ,以增加建筑物埋置部分的阻尼 ,减小结构物振幅 ,并提高其自振频率 ,降低固有周期 ,使建筑物的固有周期避开地基土的固有周期。

表 2 1B 号钻孔场地土剪切波速及固有周期

层 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
深度/m	2	4	5	7	9	10	13	15	18	20	22	24
层 厚 度/m	2	2	1	2	2	1	3	2	3	2	2	2
剪切波速/($m\cdot s^{-1}$)	108	133	167	198	276	298	286	295	308	333	375	390
T_g/s	0.074	0.134	0.158	0.198	0.227	0.241	0.283	0.310	0.349	0.373	0.394	0.415

表 3 建研院抗震所等单位采用的地基分类标准

类 别	地 基 岩 土 构 成	固有周期/s
I	基 岩	$T_g\leqslant 0.10$
II	中密以上的砂砾卵石层混砂坚硬粘性土层	$0.10 < T_g \leqslant 0.40$
III	中密以上砂层混砂粘性土层一般粘性土	$0.40 < T_g \leqslant 0.80$
IV	松软土层	$T_g > 0.80$

3.6 波速法测定地层的动力参数

在岩土工程勘察及地基和建筑物的地震反应分析中 ,地基动力参数必须事先予以确定。实践证明 ,用波速法测定地层的动力参数是一条简便有效的途径。尤其对于软弱土层和完整性较差的岩体 ,采用取样和室内试验方法测试结果精度难以保证。特别对卵石、漂石地层不能取原状土做普通土工试验 ,野外的动探数据有时不可靠(如动探头被石头顶着) ,诸如此类地层的弹性模量最好是根据波速值确定 ,再推算地基的承载力。

万方数据

3.7 评价地基液化势

液化是指物体在一定条件下由原来状态变为液态的物理作用和过程。土体发生液化时其有效应力小至零而失去抗剪形变的能力,如砂土会变成粘滞流体,造成建筑物的下沉或倾斜。因此研究地基的液化问题是一个非常重要的实际问题。剪切波速法是研究地基液化的一个简便而有效的方法。

当实测地层波速 v_s 小于该地层的液化临界波速时,有可能液化,当实测波速大于临界波速时,则地层不可能产生液化。因此只要测得地层横波速度就可以判断地基液化的可能性。关于地层临界剪切波速的确定目前还没有统一的国家标准,计算液化临界波速的公式各异。

3.8 计算饱和土层的孔隙率和重度

孔隙率和重度是天然土层重要的物理性质指标,在岩土工程设计之前均要进行测定。常用的测试方法是在现场取样后由室内试验方法测定。但对易扰动的土,如砂类土、灵敏粘性土等,用上述方法测定孔隙率和重度较困难。工程上大多由现场试验资料由经验公式估算。随着土动力学的迅速发展和学科的交叉,提出了用实测土层纵波和横波速度计算完全饱和土的孔隙率 n 和重度 r 的方法。计算公式如下:

$$n = \frac{G_s \sqrt{G_s^2 - \frac{4(G_s - 1)v_w^2}{v_p^2 - \alpha v_s^2}}}{\alpha(G_s - 1)}; \tag{6}$$

$$r = \rho_g = [(1 - n)G_s + n]\rho_w g. \tag{7}$$

式中, $\alpha = \alpha(1 - \sigma)(1 - 2\sigma)$, σ 为土骨架泊松比, α 通常在 2.25~4.33 之间; G_s 为土颗粒密度,范围在 2.65~2.75 g/cm³; ρ_w 为水的密度; v_w 为水的纵波速度,范围在 1 450~1 480 m/s; g 为重力加速度值。

3.9 确定地下水埋深

利用波速法确定地下水埋深主要利用钢和水的纵波速度已知,在有套管钻孔中利用钢管波传播到检波器的时间求取地下水埋深,在无套管的钻孔中利用钻孔中的液柱波来求取地下水的埋深。

另外根据波速资料还可以确定完全饱和土的初见深度,即因土中少量含气会使纵波波速急剧减小的特性,利用土层饱和度为 100% 和少量含气时波速值的显著差异,可方便地确定完全饱和土的初见深度。

需要说明得是波速法在地基勘察中的应用有些是必不可少的手段,如判断场地土类别、计算弹性模量、求地基土的动力参数及测定地基固有周期。有些是辅助手段,如评价饱和土的液化势、划分沉积年代、计算饱和土的孔隙率和重度、确定地下水埋深等,视具体情况选择使用。

4 结束语

1. 在地基勘察中,波速测试是一种快速廉价方便有效的方法,可以有选择地使用。
2. 大型高层建筑需要应用常时微动观测来确定地基卓越周期,以其作为建筑抗震设计的依据。
3. 有条件时可统计出波速与动弹性模量、承载力及标贯值的相关关系。以便在大范围内间接提供地基承载力和变形模量。

参考文献：

- [1] 吴世明,唐有职,陈龙珠编著.岩土工程波动勘测技术[M].北京:水力电力出版社,1990
- [2] 林宗元.京城大厦地基勘察评价工程实例[A].第三届工程勘察学术会议论文选集[C].北京:中国建筑工业出版社,1987
- [3] 王洪章.地脉动观测在高层建筑地基勘察中的应用[A].第三届工程勘察学术会议论文选集[C].北京:中国建筑工业出版社,1987

THE USE OF WAVE VELOCITY TEST TO THE FOUNDATION INVESTIGATION OF HIGH LAYER BUILDING

Wang Junru

(*Shijiazhuang University of Economics*, *Shijiazhuang* 050031)

Abstract :The calculation method of physical mechanics parameters and foundation intrinsic cycles by wave velocity test is briefly described in this paper. The application of wave velocity data in foundation investigation of high layer building is discussed with the foundation investigation of Hebei Telephone Exchange Office Building as an example.

Key words :wave velocity test ; foundation investigation ; physical mechanics parameter of rock and soil ; foundation intrinsic cycle

作者简介:王俊茹(1953-),女,河北省安国县人,毕业于河北地质学院物探系勘察地球物理专业,现任石家庄经济学院资源环境与工程系副教授。参编地质经济辞典一书,主编普通物探教程及地震勘探教材2部,发表论文17篇。

万方数据