

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 50269 – 2015

地基动力特性测试规范

Code for measurement methods of
dynamic properties of subsoil

2015 – 08 – 27 发布

2016 – 05 – 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

地基动力特性测试规范

Code for measurement methods of
dynamic properties of subsoil

GB/T 50269 - 2015

主编部门：中国机械工业联合会

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2016年5月1日

中国计划出版社

2015 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 896 号

住房和城乡建设部关于发布国家标准 《地基动力特性测试规范》的公告

现批准《地基动力特性测试规范》为国家标准,编号为 GB/T 50269—2015,自 2016 年 5 月 1 日起实施。原《地基动力特性测试规范》GB/T 50269—97 同时废止。

本规范由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2015 年 8 月 27 日

前 言

本规范是根据住房和城乡建设部《关于印发〈2010年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标〔2010〕43号)的要求,由机械工业勘察设计研究院有限公司、中国机械工业集团有限公司会同有关单位在原国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269—97的基础上修订完成的。

本规范在编制过程中,编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国外先进标准规范,与国内相关标准规范协调,并广泛征求了意见,经反复讨论、修改,最后经审查定稿。

本规范共分11章和1个附录,主要技术内容包括:总则、术语和符号、基本规定、模型基础动力参数测试、振动衰减测试、地脉动测试、波速测试、循环荷载板测试、振动三轴测试、共振柱测试、空心圆柱动扭剪测试等。

本规范修订的主要内容:

1. 将原规范中第4章“激振法测试”改为“模型基础动力参数测试”,并根据计算机技术和测试仪器发展,对本章相应内容进行了修改。

2. 对原规范中基础扭转振动参振总质量的计算公式4.5.11-2修改了一处错误,并增加变扰力时基础扭转振动参振总质量计算公式。

3. 对波速测试内容作了重大修改,增加弯曲元法测试。按照单孔法、跨孔法、面波法和弯曲元法分节制定相应规定,并根据当前波速测试技术的发展对内容进行了扩充。

4. 将振动三轴测试和共振柱测试分独立章节编制。

5. 增加空心圆柱动扭剪测试一章。

6. 将原规范附录 A 激振法测试地基动力参数计算表修订为附录 A 地基动力特性测试方法,删除原规范附录 B、附录 C、附录 D、附录 E。

本规范由住房城乡建设部负责管理,由中国机械工业联合会负责日常管理,由机械工业勘察设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送机械工业勘察设计研究院有限公司《地基动力特性测试规范》管理组(地址:陕西省西安市新城区咸宁中路 51 号,邮政编码:710043),以供修订时参考。

本规范组织单位、主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人:

组织单位:中国机械工业勘察设计协会

主编单位:机械工业勘察设计研究院有限公司

中国机械工业集团有限公司

参编单位:中航勘察设计研究院有限公司

北京市勘察设计研究院有限公司

机械工业第六设计研究院

上海交通大学

温州大学

主要起草人:郑建国 徐建 钱春宇 刘金光 韩焯

王建刚 陈龙珠 蔡袁强 徐辉

主要审查人:张建民 化建新 张同亿 杨宜谦 任书考

高广运 邢心魁 冯志焱

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(3)
3	基本规定	(13)
4	模型基础动力参数测试	(14)
4.1	一般规定	(14)
4.2	设备和仪器	(15)
4.3	模型基础	(15)
4.4	测试方法	(16)
4.5	数据处理	(17)
4.6	地基动力参数的换算	(31)
5	振动衰减测试	(35)
5.1	一般规定	(35)
5.2	测试方法	(36)
5.3	数据处理	(37)
6	地脉动测试	(38)
6.1	一般规定	(38)
6.2	设备和仪器	(38)
6.3	测试方法	(38)
6.4	数据处理	(39)
7	波速测试	(40)
7.1	单孔法	(40)
7.2	跨孔法	(42)

7.3	面波法	(44)
7.4	弯曲元法	(45)
8	循环荷载板测试	(47)
8.1	一般规定	(47)
8.2	设备和仪器	(47)
8.3	测试前的准备工作	(47)
8.4	测试方法	(48)
8.5	数据处理	(49)
9	振动三轴测试	(51)
9.1	一般规定	(51)
9.2	设备和仪器	(51)
9.3	测试方法	(52)
9.4	数据处理	(53)
10	共振柱测试	(59)
10.1	一般规定	(59)
10.2	设备和仪器	(59)
10.3	测试方法	(59)
10.4	数据处理	(60)
11	空心圆柱动扭剪测试	(65)
11.1	一般规定	(65)
11.2	设备和仪器	(65)
11.3	测试方法	(66)
11.4	数据处理	(66)
附录 A 地基动力特性测试方法		(70)
本规范用词说明		(71)
引用标准名录		(72)
附:条文说明		(73)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(3)
3	Basic requirements	(13)
4	Dynamic parameters test with model foundation	(14)
4.1	General requirements	(14)
4.2	Equipments and instruments	(15)
4.3	Model foundation	(15)
4.4	Test method	(16)
4.5	Data processing	(17)
4.6	Correction on foundation dynamic parameters	(31)
5	Vibration attenuation test	(35)
5.1	General requirements	(35)
5.2	Test method	(36)
5.3	Data processing	(37)
6	Micro-tremor test	(38)
6.1	General requirements	(38)
6.2	Equipments and instruments	(38)
6.3	Test method	(38)
6.4	Data processing	(39)
7	Wave velocity test	(40)
7.1	Single hole method	(40)
7.2	Cross hole method	(42)

7.3	Surface wave method	(44)
7.4	Bending element method	(45)
8	Cyclic loading board test	(47)
8.1	General requirements	(47)
8.2	Equipments and instruments	(47)
8.3	Preparation work before test	(47)
8.4	Test method	(48)
8.5	Data processing	(49)
9	Vibration triaxial test	(51)
9.1	General requirements	(51)
9.2	Equipments and instruments	(51)
9.3	Test method	(52)
9.4	Data processing	(53)
10	Resonant column test	(59)
10.1	General requirements	(59)
10.2	Equipments and instruments	(59)
10.3	Test method	(59)
10.4	Data processing	(60)
11	Hollow cylinder dynamic torsional shear test	(65)
11.1	General requirements	(65)
11.2	Equipments and instruments	(65)
11.3	Test method	(66)
11.4	Data processing	(66)
Appendix A	Test methods of dynamic properies of subsoil	(70)
	Explanation of wording in this code	(71)
	List of quoted standards	(72)
	Addition; Explanation of provisions	(73)

1 总 则

1.0.1 为了统一地基动力特性的测试方法,确保测试质量,为工程建设提供可靠的动力参数,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于各类建筑物和构筑物的天然地基和人工地基的动力特性测试。

1.0.3 地基动力特性测试方法,应按附录 A 的规定选用。

1.0.4 地基动力特性测试,除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 模型基础 model foundation

为现场动力参数测试而浇筑的混凝土块体基础或带承台的桩基础。

2.1.2 地基刚度 stiffness of subsoil

施加于地基上的力(力矩)与由它引起的线位移(角位移)之比。

2.1.3 振动线位移 linear displacement of vibration

振动变形体上一点变形后从原来的位置到新位置的连线距离。

2.1.4 地脉动 micro-tremor

由气象、海洋、地壳构造活动的自然力和交通等人为因素所引起的地球表面固有的微弱振动。

2.1.5 场地卓越周期 predominant period of site

场地岩土振动而出现的最大振幅的周期。

2.1.6 压缩波 compression wave

介质中质点的运动方向平行于波传播方向的波。

2.1.7 剪切波 shear wave

介质中质点的运动方向垂直于波传播方向的波。

2.1.8 瑞利波 Rayleigh wave

沿半无限弹性介质自由表面传播的偏振波。

2.1.9 弯曲元法 bending element method

将压电陶瓷弯曲元应用于测试土体波速等参数的方法。

2.1.10 破坏振次 number of cycles to cause failure

试样达到破坏标准所需的等幅循环应力作用次数。

2.1.11 动强度比 ratio of dynamic shear strength

圆柱状试样 45° 面上的动剪强度与初始法向有效应力的比值。

2.1.12 振次比 cycle ratio

动应力作用下的振次与破坏振次的比值。

2.1.13 动孔压比 ratio of dynamic pore pressure

在循环应力作用下试样的孔隙水压力增量与侧向有效固结应力的比值。

2.1.14 动剪应力比 ratio of dynamic shear stress

试样 45° 面上的动剪应力与侧向有效固结应力的比值。

2.1.15 动剪切模量比 ratio of dynamic shear modulus

对应于某一剪应变幅的动剪切模量,与同一固结应力条件下的最大动剪切模量的比值。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应:

d ——为 0.707 基础水平回转耦合振动第一振型共振频率所对应的水平线位移;

d_0 ——振源处的振动线位移;

d_b ——基础底面的水平振动线位移;

d_{11} ——第 1 周的振动线位移;

d_i ——在幅频响应曲线上选取的第 i 点的频率所对应的振动线位移;

d_m ——基础竖向振动的共振振动线位移;

d_{max} ——基础最大振动线位移;

d_{m1} ——基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点水平振动线位移;

$d_{m\phi}$ ——基础扭转振动共振峰点水平振动线位移;

- d_{n+1} ——第 $n+1$ 周的振动线位移；
- d_r ——距振源的距离为 r 处的地面振动线位移；
- d_x ——基础重心处的水平振动线位移；
- $d_{x\varphi}$ ——基础顶面的水平振动线位移；
- $d_{x\varphi 1}$ ——第 1 周的水平振动线位移；
- $d_{x\varphi n+1}$ ——第 $n+1$ 周的水平振动线位移；
- $d_{x\psi}$ ——为 0.707 基础扭转振动的共振频率所对应的水平振动线位移；
- d_z ——试样顶端的轴向振动线位移幅；
- $d_{z\varphi}$ ——基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；
- $d_{z\varphi 1}$ ——第 1 台传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；
- $d_{z\varphi 2}$ ——第 2 台传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；
- d_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的振动线位移；
- d_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的振动线位移；
- f_{a1} ——无试样时激振压板系统扭转向共振频率；
- f_{a1} ——无试样时激振压板系统轴向共振频率；
- f_d ——基础有阻尼固有频率；
- f_{d1} ——基础水平回转耦合振动第一振型有阻尼固有频率；
- f_i ——在幅频响应曲线上选取的第 i 点的频率；
- f_m ——基础竖向振动的共振频率；
- f_{m1} ——基础水平回转耦合振动第一振型共振频率；
- $f_{m\varphi}$ ——基础扭转振动的共振频率；
- f_{nz} ——基础竖向无阻尼固有频率；
- f_{n1} ——基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率；
- f_{nx} ——基础水平向无阻尼固有频率；
- $f_{n\varphi}$ ——基础回转无阻尼固有频率；

- $f_{n\psi}$ ——基础扭转振动无阻尼固有频率；
- f_0 ——激振频率；
- f_t ——试样系统扭转振动的共振频率；
- f_l ——试样系统轴向振动的共振频率；
- $\omega_{m\psi}$ ——基础扭转振动固有圆频率；
- ω_{n1} ——基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有圆频率 (rad/s)；
- ω_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的振动圆频率 (rad/s)；
- ω_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的振动圆频率 (rad/s)。

2.2.2 计算指标：

- c_d ——总应力抗剪强度中的动凝聚力；
- E ——地基弹性模量；
- E_{dmax} ——最大动弹性模量；
- G_{dmax} ——最大动剪切模量；
- K_z ——地基(或桩基)抗压刚度；
- K_{z0} ——明置模型基础的地基抗压刚度；
- K'_{z0} ——埋置模型基础的地基抗压刚度；
- K_x ——地基抗剪刚度；
- K_{x0} ——明置模型基础的地基抗剪刚度；
- K'_{x0} ——埋置模型基础的地基抗剪刚度；
- K_φ ——地基抗弯刚度；
- $K_{\varphi0}$ ——明置模型基础的地基抗弯刚度；
- $K'_{\varphi0}$ ——埋置模型基础的地基抗弯刚度；
- K_ψ ——地基抗扭刚度；
- $K_{\psi0}$ ——明置模型基础的地基抗扭刚度；
- $K'_{\psi0}$ ——埋置模型基础的地基抗扭刚度；
- K_{pz} ——单桩抗压刚度；

- K_{pq} ——桩基抗弯刚度；
 m_a ——试样顶端激振压板系统的质量；
 m_d ——设计基础的质量；
 m_{dr} ——设计基础的质量比；
 m_l ——模型基础的质量；
 m_r ——模型基础的质量比；
 m_s ——试样的总质量；
 m_z ——基础竖向振动的参振总质量(包括基础、激振设备和地基参加振动的当量质量)；
 $m_{x\varphi}$ ——基础水平回转耦合振动的参振总质量(包括基础、激振设备和地基参加振动的当量质量)；
 m_ψ ——基础扭转振动的参振总质量(包括基础、激振设备和地基参加振动的当量质量)；
 m_0 ——激振设备旋转部分的质量；
 m_1 ——重锤的质量；
 M_ψ ——激振设备的扭转力矩；
 E_d ——试样动弹性模量；
 G_d ——试样动剪切模量；
 p_o ——试样外围压；
 p_i ——试样内围压；
 P ——电磁式激振设备的扰力；
 P_a ——大气压力；
 P_d ——设计基础底面静压力；
 P_L ——最后一级加载作用下，承压板底的总静应力；
 P_0 ——模型基础底面静压力；
 P_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的扰力；
 P_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的扰力；
 q ——广义剪应力幅值；
 Q ——承压板上最后一级加载后的总荷载；

- r_i ——第 i 根桩的轴线至基础底面形心回转轴的距离；
- R_f —— 45° 面上试样的动强度比；
- R_{ff} ——对应于等效破坏振次的动强度比；
- S ——加荷时地基变形量；
- S_p ——卸荷时地基塑性变形量；
- S_e ——地基弹性变形量；
- S_{eL} ——在地基弹性变形量-应力直线图上，相应于最后一级加载的地基弹性变形量；
- T ——试样扭矩；
- v_g ——重锤自由下落时的速度；
- v_p ——压缩波波速；
- v_R ——瑞利波波速；
- v_s ——剪切波波速；
- W ——试样轴力；
- α ——地基能量吸收系数；
- α_0 ——潜在破坏面上的初始剪应力比；
- μ ——地基的泊松比；
- μ_d ——试样的泊松比；
- ρ ——质量密度；
- ζ_z ——地基竖向阻尼比；
- ζ_{zi} ——第 i 点计算的地基竖向阻尼比；
- $\zeta_{x\varphi_1}$ ——地基水平回转向第一振型阻尼比；
- ζ_ϕ ——地基扭转向阻尼比；
- γ_d ——试样动剪应变幅；
- γ_{z0} ——试样剪应变；
- ϵ_d ——试样动轴应变幅；
- ϵ_r ——试样径向应变；
- ϵ_x ——试样轴向应变；
- ϵ_θ ——试样环向应变；

- ϵ_1 —— 试样大主应变；
- ϵ_2 —— 试样中主应变；
- ϵ_3 —— 试样小主应变；
- ζ_t —— 试样扭转向阻尼比；
- $\zeta_{x\varphi_1 0}$ —— 明置模型基础的地基水平回转向第一振型阻尼比；
- $\zeta_{x\varphi_1}^c$ —— 明置设计基础的地基水平回转向第一振型阻尼比；
- ζ_{x0} —— 明置模型基础的地基竖向阻尼比；
- ζ_z^c —— 明置设计基础的地基竖向阻尼比；
- ζ_{dz} —— 试样轴向振动阻尼比；
- ζ_1 —— 第一点计算的地基竖向阻尼比；
- ζ_2 —— 第二点计算的地基竖向阻尼比；
- $\zeta_{\psi 0}$ —— 明置模型基础的地基扭转向阻尼比；
- $\zeta'_{\psi 0}$ —— 埋置测试的模型基础的地基扭转向阻尼比；
- ζ_{ψ}^c —— 明置设计基础的地基扭转向阻尼比；
- σ_d —— 试样轴向动应力幅；
- σ_r —— 试样径向应力；
- σ_z —— 试样轴向应力；
- σ'_0 —— 试样平均有效主应力；
- σ'_1 —— 试样有效大主应力；
- σ'_2 —— 试样有效中主应力；
- σ'_3 —— 试样有效小主应力；
- σ_{f0} —— 潜在破坏面上的初始法向应力；
- σ_{1c} —— 试样初始轴向固结应力；
- σ_{3c} —— 试样侧向固结应力；
- σ'_{1c} —— 试样固结完后的大主应力值；
- σ'_{2c} —— 试样固结完后的中主应力值；
- σ'_{3c} —— 试样固结完后的的小主应力值；
- σ_{θ} —— 试样环向应力；
- Δu —— 试样孔隙水压力；

- τ_d ——试样的动剪应力幅；
- τ_{f0} ——潜在破坏面上的初始剪应力；
- τ_{fd} ——相应于工程等效破坏振次的动强度；
- τ_{fs} ——潜在破坏面上的总应力抗剪强度；
- τ_{zd} ——试样剪应力。

2.2.3 几何参数：

- A_d ——设计基础底面积；
- A_s ——轴向动应力-动应变滞回圈的面积；
- A_t ——轴向动应力-动应变滞回曲线图中直角三角形面积；
- A_0 ——模型基础底面积；
- D ——承压板直径；
- D_s ——试样直径；
- D_1 ——空心圆柱体试样的外径；
- D_2 ——空心圆柱体试样的内径；
- e_0 ——激振设备旋转部分质量的偏心距；
- e_e ——激振设备的水平扭转力矩力臂；
- h ——模型基础高度；
- h_1 ——基础重心至基础顶面的距离；
- h_2 ——基础重心至基础底面的距离；
- h_3 ——基础重心至激振器水平扰力的距离；
- h_s ——试样高度；
- h_t ——模型基础的埋置深度；
- h_d ——设计基础的埋置深度；
- H ——测点的深度；
- H_0 ——振源与孔口的高差；
- H_1 ——重锤下落高度；
- H_2 ——重锤回弹高度；
- ΔH ——波速层的厚度；
- I ——基础底面对通过其形心轴的惯性矩；

- I_z ——基础底面对通过其形心轴的极惯性矩；
- J ——基础对通过其重心轴的转动惯量；
- J_s ——试样顶端激振压板系统的转动惯量；
- J_c ——基础对通过其底面形心轴的转动惯量；
- J_s ——试样的转动惯量；
- J_z ——基础对通过其重心轴的极转动惯量；
- l ——基础长度；
- l_ψ ——扭转轴至实测线位移点的距离；
- l_1 ——两台竖向传感器的间距；
- Δl ——两台传感器之间的水平距离；
- L ——从板中心到测试孔的水平距离；
- r_o ——试样外半径；
- r_i ——试样内半径；
- r_0 ——模型基础的当量半径；
- S_1 ——由振源到第 1 个接收孔测点的距离；
- S_2 ——由振源到第 2 个接收孔测点的距离；
- ΔS ——由振源到两个接收孔测点的距离之差；
- θ ——试样顶端的角位移幅；
- φ ——两台传感器接收到的振动波之间的相位差；
- φ_d ——试样的动内摩擦角；
- φ_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的扰力与振动线位移之间的相位角；
- φ_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的扰力与振动线位移之间的相位角；
- φ_{m1} ——基础第一振型共振峰点的回转角位移；
- ρ_1 ——基础第一振型转动中心至基础重心的距离。

2.2.4 计算参数：

- C_x ——地基抗剪刚度系数；
- C_z ——地基抗压刚度系数；

C_{φ} ——地基抗弯刚度系数；

C_{ψ} ——地基抗扭刚度系数；

C_1, m_1 ——最大动剪切模量与平均有效应力关系双对数拟合直线参数；

C_2, m_2 ——最大动弹性模量与平均固结应力关系双对数拟合直线参数；

e_1 ——回弹系数；

F_t ——扭转向无量纲频率因数；

F_l ——轴向无量纲频率因数；

g ——重力加速度；

n ——在幅频响应曲线上选取计算点的数量；

n_f ——自由振动周期数；

n_p ——桩数；

t_0 ——两次冲击的时间间隔；

S_t ——试样系统扭转向能量比；

S_l ——试样系统轴向能量比；

T_1 ——仪器激振端轴向惯量因数；

ΔT ——压缩波或剪切波传到波速层顶面和底面的时间差；

T_L ——压缩波或剪切波从振源到达测点的实测时间；

T_{P1} ——压缩波到达第 1 个接收孔测点的时间；

T_{P2} ——压缩波到达第 2 个接收孔测点的时间；

T_{S1} ——剪切波到达第 1 个接收孔测点的时间；

T_{S2} ——剪切波到达第 2 个接收孔测点的时间；

α_z ——基础埋深对地基抗压刚度的提高系数；

α_x ——基础埋深对地基抗剪刚度的提高系数；

α_{φ} ——基础埋深对地基抗弯刚度的提高系数；

α_{ψ} ——基础埋深对地基抗扭刚度的提高系数；

β_z ——基础埋深对竖向阻尼比的提高系数；

$\beta_{x\varphi_1}$ ——基础埋深对水平回转向第一振型阻尼比的提高系数；

- β_{ϕ} ——基础埋深对扭转向阻尼比的提高系数；
- β_i ——基础竖向振动的共振振动线位移与幅频响应曲线上选取的第 i 点振动线位移的比值；
- δ_{at} ——无试样时激振压板系统扭转自由振动的对数衰减率；
- δ_{al} ——仪器激振端压板系统轴向自由振动对数衰减率；
- δ_d ——设计块体基础或桩基础的埋深比；
- δ_t ——试样系统扭转自由振动的对数衰减率；
- δ_0 ——模型基础的埋深比；
- δ_l ——试样系统轴向自由振动的对数衰减率；
- η ——基础底面积与基础底面静压力的换算系数；
- η_s ——斜距校正系数；
- η_{μ} ——与泊松比有关的系数；
- ξ ——与基础的质量比有关的换算系数；
- ξ_0 ——无量纲系数。

3 基本规定

3.0.1 地基动力特性测试前应制定测试方案,测试方案应包括下列内容:

- 1 测试目的和要求;
- 2 测试内容、测试方法和测点仪器布置图;
- 3 数据分析方法。

3.0.2 地基动力特性现场测试应具备下列资料:

- 1 场地的岩土工程勘察资料;
- 2 场地的地下设施、地下管道、地下电缆等的平面图和纵剖面图;
- 3 测试现场及其邻近的振动干扰源。

3.0.3 地基动力特性测试使用的测试仪器应在有效的检定或校准期内,测试前应对仪器设备检测调试。

3.0.4 测试现场应避免外界干扰振源,测点应避免水泥或沥青路面、地下管道和电缆等影响测试数据的场所。

3.0.5 测试报告的内容应包括原始资料、测试仪器、测试结果、测试分析和测试结论。

4 模型基础动力参数测试

4.1 一般规定

4.1.1 周期性振动机器的基础应采用强迫振动测试方法；冲击性振动机器的基础应采用自由振动测试方法。

4.1.2 模型基础动力参数测试，除应符合本规范第 3.0.2 条的规定外，尚应具备下列资料：

- 1 机器的型号、转速、功率；
- 2 设计基础的位置和基底标高；
- 3 当采用桩基时，桩的设计长度、截面尺寸及间距。

4.1.3 模型基础动力参数的测试结果应包括下列内容：

- 1 测试的各种幅频响应曲线；
- 2 动力参数的测试值；
- 3 动力参数的设计值。

4.1.4 模型基础应在明置和埋置的情况下分别进行振动测试。埋置基础周边回填土应分层夯实，回填土的压实系数不宜小于 0.94。

4.1.5 桩基的测试应取得下列动力参数：

- 1 单桩的抗压刚度；
- 2 桩基抗剪和抗扭刚度系数；
- 3 桩基竖向和水平回转向第一振型以及扭转向的阻尼比；
- 4 桩基竖向和水平回转向以及扭转向的参振总质量。

4.1.6 天然地基和人工地基的测试应取得下列动力参数：

- 1 地基抗压、抗剪、抗弯和抗扭刚度系数；
- 2 地基竖向、水平回转向第一振型及扭转向的阻尼比；
- 3 地基基础竖向、水平回转向及扭转向的参振总质量。

4.2 设备和仪器

4.2.1 强迫振动测试的激振设备应符合下列规定：

- 1 采用机械式激振设备时，工作频率宜为 3Hz~60Hz；
- 2 采用电磁式激振设备时，激振力不宜小于 2000N。

4.2.2 自由振动测试时，竖向激振宜采用重锤自由落体的方式进行，重锤质量不宜小于基础质量的 1/100，落高宜为 0.5m~1.0m。

4.2.3 传感器宜采用竖向和水平向的速度型传感器，其通频带应为 2Hz~80Hz，阻尼系数应为 0.65~0.70，电压灵敏度不应小于 30V·s/m，可测位移不应小于 0.5mm。

4.2.4 放大器应采用带低通滤波功能的多通道放大器，其各通道幅值一致性偏差不应大于 3%，各通道相位一致性偏差不应大于 0.1ms，折合输入端的噪声水平应低于 1 μ V，电压增益应大于 80dB。

4.2.5 采集与记录装置宜采用模/数转换不低于 16 位的多通道数字采集和存储系统。数据分析装置应具有频谱分析及专用分析软件功能。

4.3 模型基础

4.3.1 块体基础的尺寸宜采用 2.0m×1.5m×1.0m，每组数量不宜少于 2 个。

4.3.2 桩基础宜采用 2 根桩，桩间距应取设计桩基础的间距；承台的长宽比应为 2:1，其高度不宜小于 1.6m；承台沿长度方向的中心轴应与两桩中心连线重合，承台宽度宜与桩间距相同。

4.3.3 模型基础应置于拟建基础的邻近处，其土层结构宜与拟建基础的土层结构相同。

4.3.4 模型基础做明置工况测试时，坑底应保持土层的原状结构，坑底面应保持平整。基坑坑壁至模型基础侧面的距离应大于 500mm。

4.3.5 当采用机械式激振设备时,地脚螺栓的埋设深度不宜小于400mm;地脚螺栓或预留孔在模型基础平面上的位置应符合下列规定:

1 竖向振动测试时,应使激振设备的竖向扰力中心通过基础的重心;

2 水平振动测试时,应使水平扰力矢量方向与基础沿长度方向的中心轴向一致;

3 扭转振动测试时,激振设备施加的扭转力矩,应使基础产生绕重心竖轴的扭转振动。

4.4 测试方法

4.4.1 竖向振动测试时,在基础顶面沿长度方向中轴线的两端应对称布置两个竖向传感器。

4.4.2 水平回转振动测试时,在基础顶面沿长度方向中轴线的两端应对称布置两个竖向传感器;并应在中间布置一个水平向传感器,其水平振动方向应与中轴线平行。

4.4.3 扭转振动测试时,在基础顶面沿长度方向中轴线的两端应对称布置两个水平向传感器,其水平振动方向应与中轴线垂直。

4.4.4 强迫振动幅频响应测试时,其激振设备的扰力频率间隔,共振区外不宜大于2Hz,共振区内不应大于1Hz;共振时的振动线位移不宜大于150 μm 。

4.4.5 强迫振动数据分析,应取振动波形的正弦波部分。

4.4.6 竖向自由振动测试,宜采用重锤自由下落冲击模型基础顶面的中心处,实测基础的固有频率和最大振动线位移。测试有效次数不应少于3次。

4.4.7 水平回转自由振动的测试,可水平冲击与模型基础沿长度方向中轴线垂直的侧面,实测基础的固有频率和最大振动线位移。测试有效次数不应少于3次。

4.5 数据处理

I 强迫振动

4.5.1 数据处理应采用频谱分析方法,谱线间隔不宜大于0.1Hz。各通道采样点数不宜小于1024点,采样频率应符合采样定理要求,并采用加窗函数进行平滑处理。

4.5.2 数据处理应得到下列幅频响应曲线:

1 竖向振动时,为基础竖向振动线位移随频率变化的幅频响应曲线;

2 水平回转耦合振动时,为基础顶面测试点的水平振动线位移随频率变化的幅频响应曲线,及基础顶面测试点由回转振动产生的竖向振动线位移随频率变化的幅频响应曲线;

3 扭转振动时,为基础顶面测试点在扭转力矩作用下的水平振动线位移随频率变化的幅频响应曲线。

4.5.3 地基竖向阻尼比应在基础竖向振动线位移随频率变化的幅频响应曲线上,选取共振峰峰点和在基础竖向振动的共振频率0.5~0.85范围内不少于三点的频率和振动线位移(如图4.5.3-1、图4.5.3-2所示),并应按下列公式计算:

$$\zeta_z = \frac{\sum_{i=1}^n \zeta_{zi}}{n} \quad (4.5.3-1)$$

$$\zeta_{zi} = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\beta_i^2 - 1}{\alpha_i^4 - 2\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.3-2)$$

$$\beta_i = \frac{d_m}{d_i} \quad (4.5.3-3)$$

$$\text{当为变扰力时: } \alpha_i = \frac{f_m}{f_i} \quad (4.5.3-4)$$

$$\text{当为常扰力时: } \alpha_i = \frac{f_i}{f_m} \quad (4.5.3-5)$$

式中: ζ_z ——地基竖向阻尼比;

- ζ_{zi} ——第 i 点计算的地基竖向阻尼比；
- f_m ——基础竖向振动的共振频率(Hz)；
- d_m ——基础竖向振动的共振振动线位移(m)；
- f_i ——在幅频响应曲线上选取的第 i 点的频率(Hz)；
- d_i ——在幅频响应曲线上选取的第 i 点的频率所对应的振动线位移(m)；
- β_i ——基础竖向振动的共振振动线位移与幅频响应曲线上选取的第 i 点振动线位移的比值；
- α_i ——基础竖向振动的共振频率与幅频响应曲线上选取的第 i 点频率的比值；
- n ——在幅频响应曲线上选取计算点的数量。

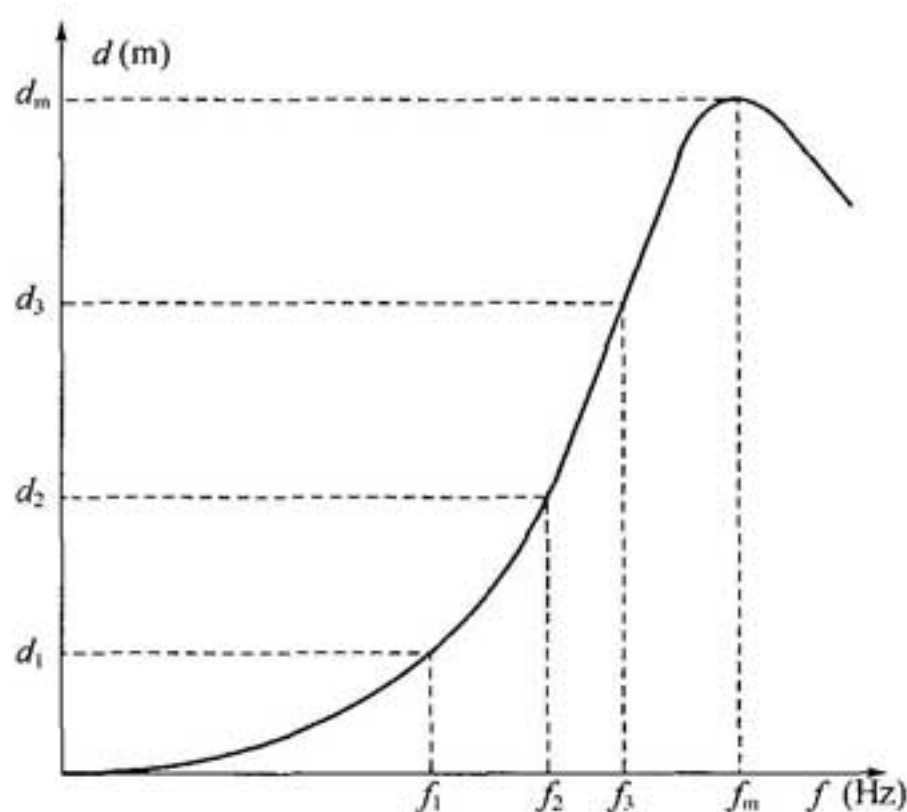


图 4.5.3-1 变扰力的幅频响应曲线

- d —振动线位移； d_m —基础竖向振动的共振振动线位移；
- d_1 —在幅频响应曲线上选取的第 1 点的频率所对应的振动线位移；
- d_2 —在幅频响应曲线上选取的第 2 点的频率所对应的振动线位移；
- d_3 —在幅频响应曲线上选取的第 3 点的频率所对应的振动线位移；
- f —频率； f_m —基础竖向振动的共振频率； f_1 —在幅频响应曲线上选取的第 1 点的频率；
- f_2 —在幅频响应曲线上选取的第 2 点的频率； f_3 —在幅频响应曲线上选取的第 3 点的频率

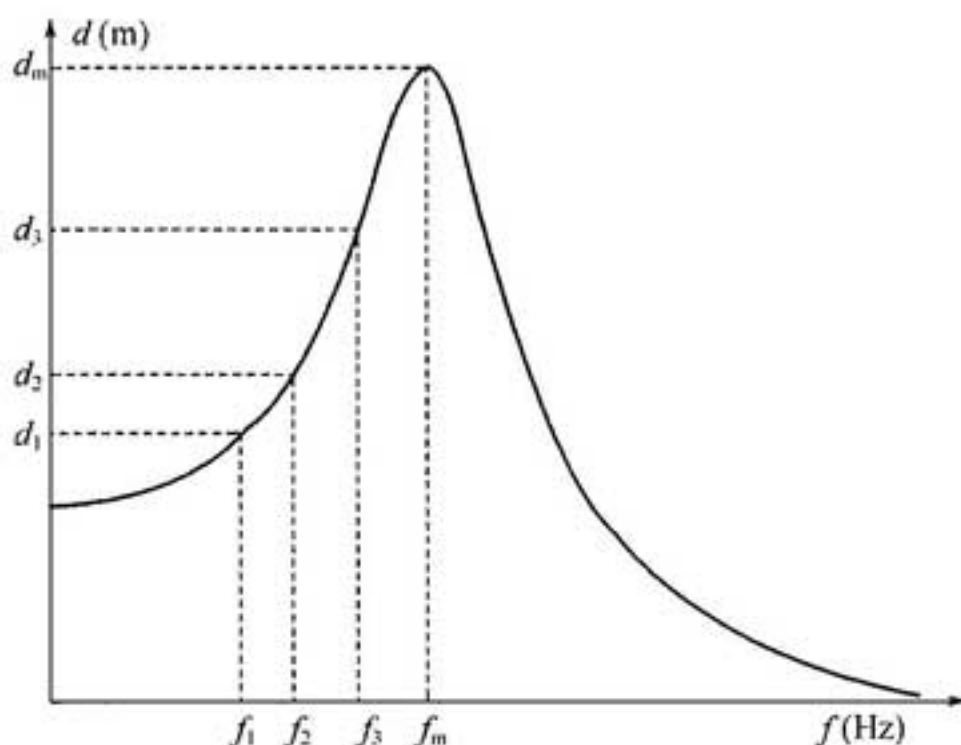


图 4.5.3-2 常扰力的幅频响应曲线

d —振动线位移； d_m —基础竖向振动的共振振动线位移；
 d_1 —在幅频响应曲线上选取的第 1 点的频率所对应的振动线位移；
 d_2 —在幅频响应曲线上选取的第 2 点的频率所对应的振动线位移；
 d_3 —在幅频响应曲线上选取的第 3 点的频率所对应的振动线位移；
 f —频率； f_m —基础竖向振动的共振频率；
 f_1 —在幅频响应曲线上选取的第 1 点的频率；
 f_2 —在幅频响应曲线上选取的第 2 点的频率；
 f_3 —在幅频响应曲线上选取的第 3 点的频率

4.5.4 基础竖向振动的参振总质量应按下列公式计算：

1 当为变扰力时：

$$m_z = \frac{m_0 e_0}{d_m} \cdot \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.5.4-1)$$

2 当为常扰力时：

$$m_z = \frac{P}{d_m (2\pi f_{nz})^2} \cdot \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.5.4-2)$$

$$f_{nz} = \frac{f_m}{\sqrt{1 - 2\zeta_z^2}} \quad (4.5.4-3)$$

式中： m_z ——基础竖向振动的参振总质量(t)；
 m_0 ——激振设备旋转部分的质量(t)；

e_0 ——激振设备旋转部分质量的偏心距(m)；

P ——电磁式激振设备的扰力(kN)；

f_{nz} ——基础竖向无阻尼固有频率(Hz)。

注：当 m_z 大于基础质量的 2 倍时，应取 m_z 等于基础质量的 2 倍。

4.5.5 地基抗压刚度、地基抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度，应按下列公式计算：

1 当为变扰力时：

$$K_z = m_z (2\pi f_{nz})^2 \quad (4.5.5-1)$$

$$C_z = \frac{K_z}{A_0} \quad (4.5.5-2)$$

$$K_{pz} = \frac{K_z}{n_p} \quad (4.5.5-3)$$

$$K_{p\varphi} = K_{pz} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (4.5.5-4)$$

$$f_{nz} = f_m \sqrt{1 - 2\zeta_z^2} \quad (4.5.5-5)$$

式中： K_z ——地基(或桩基)抗压刚度(kN/m)；

C_z ——地基抗压刚度系数(kN/m³)；

K_{pz} ——单桩抗压刚度(kN/m)；

$K_{p\varphi}$ ——桩基抗弯刚度(kN·m)；

r_i ——第 i 根桩的轴线至基础底面形心回转轴的距离(m)；

A_0 ——模型基础底面积(m²)；

n_p ——桩数。

2 当为常扰力时，地基抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度应按本规范公式(4.5.5-2)~(4.5.5-4)计算；地基(或桩基)抗压刚度，可按下式计算：

$$K_z = \frac{P}{d_m} \cdot \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.5.5-6)$$

4.5.6 当基础的固有频率较高不能测出共振峰值时，宜采用低频区段求刚度的方法(如图 4.5.6 所示)按下列公式计算：

$$m_z = \frac{\frac{P_1}{d_1} \cos \varphi_1 - \frac{P_2}{d_2} \cos \varphi_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (4.5.6-1)$$

$$\zeta_1 = \frac{\tan \varphi_1 \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2}{2 \frac{\omega_1}{\omega_2}} \quad (4.5.6-2)$$

$$\zeta_2 = \frac{\tan \varphi_2 \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2}{2 \frac{\omega_1}{\omega_2}} \quad (4.5.6-3)$$

$$\zeta_z = \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{2} \quad (4.5.6-4)$$

$$K_z = \frac{P_1}{d_1} \cos \varphi_1 + m_z \omega_1^2 \quad (4.5.6-5)$$

- 式中： P_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的扰力(kN)；
 P_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的扰力(kN)；
 d_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的振动线位移(m)；
 d_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的振动线位移(m)；
 φ_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的扰力与振动线位移之间的相位角，由测试确定；
 φ_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的扰力与振动线位移之间的相位角，由测试确定；
 ω_1 ——幅频响应曲线上选取的第一个点对应的振动圆频率(rad/s)；
 ω_2 ——幅频响应曲线上选取的第二个点对应的振动圆频率(rad/s)；
 ζ_1 ——第一点计算的地基竖向阻尼比；
 ζ_2 ——第二点计算的地基竖向阻尼比。

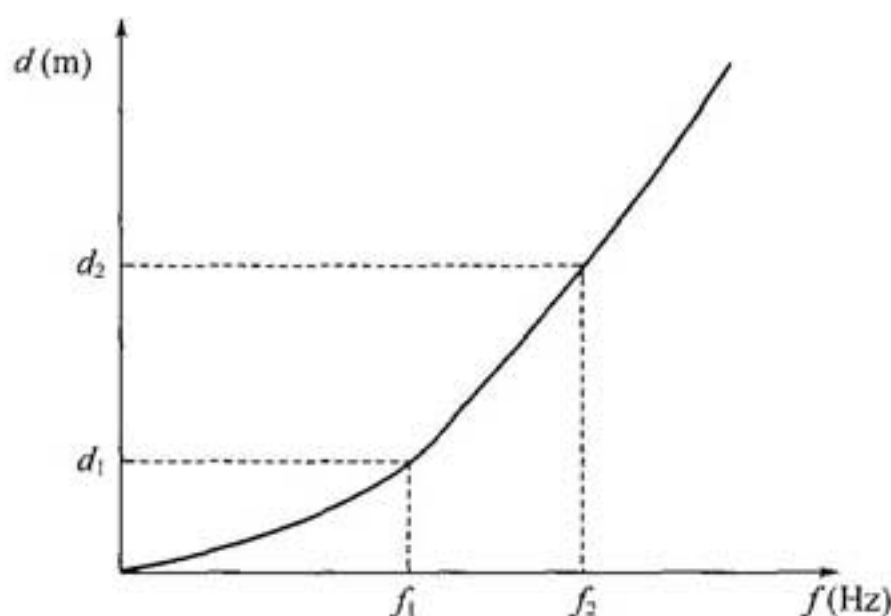


图 4.5.6 未测得共振峰的幅频响应曲线

d —振动线位移; d_1 —在幅频响应曲线上选取的第 1 个点对应的振动线位移;

d_2 —在幅频响应曲线上选取的第 2 个点对应的振动线位移;

f —频率; f_1 —在幅频响应曲线上选取的第 1 点的频率;

f_2 —在幅频响应曲线上选取的第 2 点的频率

4.5.7 地基水平回转向第一振型阻尼比,应在幅频响应曲线上选取基础水平回转耦合振动第一振型共振频率和为 0.707 基础水平回转耦合振动第一振型共振频率所对应的水平振动线位移(如图 4.5.7-1、图 4.5.7-2 所示),并应按下列公式计算:

1 当为变扰力时:

$$\zeta_{x\varphi_1} = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{d_{m1}} \right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.7-1)$$

2 当为常扰力时:

$$\zeta_{x\varphi_1} = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{1}{3 - 4 \left(\frac{d_{m1}}{d} \right)^2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.7-2)$$

式中: $\zeta_{x\varphi_1}$ ——地基水平回转向第一振型阻尼比;

d_{m1} ——基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点水平振动线位移(m);

d ——为 0.707 基础水平回转耦合振动第一振型共振频率所对应的水平线位移(m)。

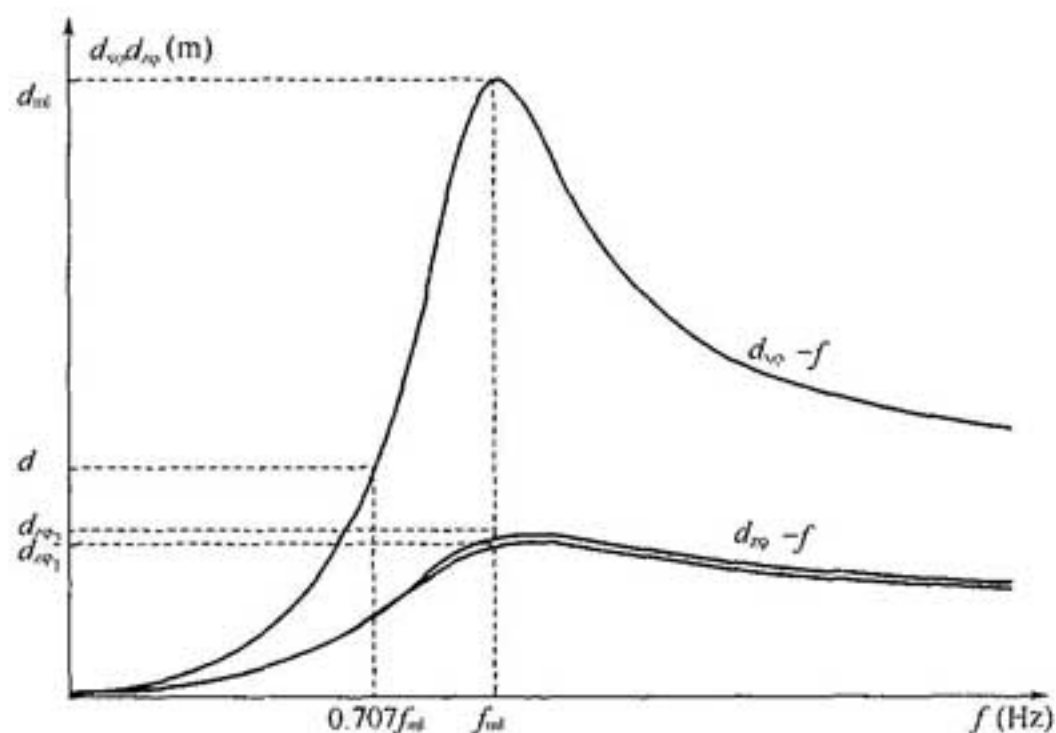


图 4.5.7-1 变扰力的幅频响应曲线

$d_{xq}-f$ —基础顶面的水平振动线位移与频率的关系；

$d_{vo}-f$ —基础顶面的竖向振动线位移与频率的关系；

d —为 0.707 基础水平回转耦合振动第一振型共振频率所对应的水平线位移；

d_{m1} —基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点水平振动线位移；

d_{xq} —基础顶面的水平振动线位移； d_{vo} —基础顶面的竖向振动线位移；

d_{vo1} —第 1 台竖向传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；

d_{vo2} —第 2 台竖向传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；

f —频率； f_{m1} —基础水平回转耦合振动第一振型共振频率

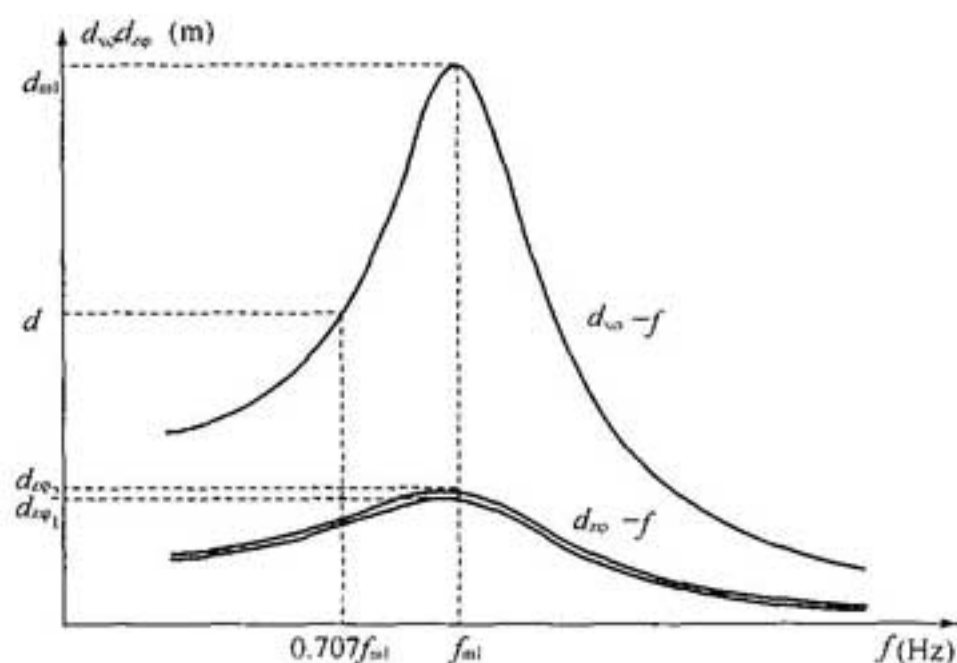


图 4.5.7-2 常扰力的幅频响应曲线

$d_{x\varphi} - f$ —基础顶面的水平振动线位移与频率的关系；

$d_{z\varphi} - f$ —基础顶面的竖向振动线位移与频率的关系；

d —为 0.707 基础水平回转耦合振动第一振型共振频率所对应的水平线位移；

d_{m1} —基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点水平振动线位移；

$d_{x\varphi}$ —基础顶面的水平振动线位移； $d_{z\varphi}$ —基础顶面的竖向振动线位移；

$d_{z\varphi_1}$ —第 1 台竖向传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；

$d_{z\varphi_2}$ —第 2 台竖向传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移；

f —频率； f_{m1} —基础水平回转耦合振动第一振型共振频率

4.5.8 基础水平回转耦合振动的参振总质量应按下列公式计算：

1 当为变扰力时：

$$m_{x\varphi} = \frac{m_0 e_0 (\rho_1 + h_3) (\rho_1 + h_1)}{d_{m1}} \cdot \frac{1}{2\zeta_{x\varphi_1} \sqrt{1 - \zeta_{x\varphi_1}^2}} \cdot \frac{1}{i^2 + \rho_1^2} \quad (4.5.8-1)$$

$$\rho_1 = \frac{d_x}{\varphi_{m1}} \quad (4.5.8-2)$$

$$\varphi_{m1} = \frac{|d_{z\varphi_1}| + |d_{z\varphi_2}|}{l_1} \quad (4.5.8-3)$$

$$d_x = d_{m1} - h_2 \varphi_{m1} \quad (4.5.8-4)$$

$$i = \left[\frac{1}{12} (l^2 + h^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.8-5)$$

2 当为常扰力时：

$$m_{x\varphi} = \frac{P (\rho_1 + h_3) (\rho_1 + h_1)}{d_{m1} (2\pi f_{n1})^2} \cdot \frac{1}{2\zeta_{x\varphi_1} \sqrt{1 - \zeta_{x\varphi_1}^2}} \cdot \frac{1}{i^2 + \rho_1^2} \quad (4.5.8-6)$$

$$f_{n1} = \frac{f_{m1}}{\sqrt{1 - 2\zeta_{x\varphi_1}^2}} \quad (4.5.8-7)$$

式中： $m_{x\varphi}$ ——基础水平回转耦合振动的参振总质量(t)；

ρ_1 ——基础第一振型转动中心至基础重心的距离(m)；

d_x ——基础重心处的水平振动线位移(m)；

φ_{m1} ——基础第一振型共振峰点的回转角位移(rad)；

- l_1 ——两台竖向传感器的间距(m);
- l ——基础长度(m);
- h ——基础高度(m);
- h_1 ——基础重心至基础顶面的距离(m);
- h_2 ——基础重心至基础底面的距离(m);
- h_3 ——基础重心至激振器水平扰力的距离(m);
- f_{m1} ——基础水平回转耦合振动第一振型共振频率(Hz);
- f_{n1} ——基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率(Hz);
- $d_{z\varphi_1}$ ——第1台传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移(m);
- $d_{z\varphi_2}$ ——第2台传感器测试的基础水平回转耦合振动第一振型共振峰点竖向振动线位移(m);
- i ——基础回转半径(m)。

注:当 $m_{x\varphi}$ 大于基础质量的 1.4 倍时,应取 $m_{x\varphi}$ 等于基础质量的 1.4 倍。

4.5.9 地基抗剪刚度、地基抗剪刚度系数应按下列公式计算:

1 当为变扰力时:

$$K_x = m_{x\varphi} (2\pi f_{nx})^2 \quad (4.5.9-1)$$

$$C_x = \frac{K_x}{A_0} \quad (4.5.9-2)$$

$$f_{nx} = \frac{f_{n1}}{\sqrt{1 - \frac{h_2}{\rho_1}}} \quad (4.5.9-3)$$

$$f_{n1} = f_{m1} \sqrt{1 - 2\zeta_{x\varphi_1}^2} \quad (4.5.9-4)$$

式中: K_x ——地基抗剪刚度(kN/m);

C_x ——地基抗剪刚度系数(kN/m³);

f_{nx} ——基础水平向无阻尼固有频率(Hz)。

2 当为常扰力时,地基抗剪刚度、地基抗剪刚度系数应按本规范公式(4.5.9-1)~(4.5.9-3)计算,基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率应按本规范公式(4.5.8-7)计算。

4.5.10 地基抗弯刚度和地基抗弯刚度系数应按下列公式计算：

1 当为变扰力时：

$$K_{\varphi} = J (2\pi f_{n\varphi})^2 - K_x h_2^2 \quad (4.5.10-1)$$

$$C_{\varphi} = \frac{K_{\varphi}}{I} \quad (4.5.10-2)$$

$$f_{n\varphi} = \sqrt{\rho_1 \frac{h_2}{i^2} f_{nx}^2 + f_{n1}^2} \quad (4.5.10-3)$$

式中： K_{φ} ——地基抗弯刚度(kN·m)；

C_{φ} ——地基抗弯刚度系数(kN/m³)；

$f_{n\varphi}$ ——基础回转无阻尼固有频率(Hz)；

J ——基础对通过其重心轴的转动惯量(t·m²)；

I ——基础底面对通过其形心轴的惯性矩(m⁴)。

2 当为常扰力时，地基抗弯刚度和地基抗弯刚度系数应按本规范公式(4.5.10-1)~(4.5.10-3)计算，基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率应按本规范公式(4.5.8-7)计算。

4.5.11 地基扭转向阻尼比应在扭转力矩作用下的水平振动线位移随频率变化的幅频响应曲线上选取基础扭转振动的共振频率和为0.707基础扭转振动的共振频率所对应的水平振动线位移，并按下列公式计算：

1 当为变扰力时：

$$\zeta_{\psi} = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_{x\psi}}{d_{m\psi}} \right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.11-1)$$

2 当为常扰力时：

$$\zeta_{\psi} = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{1}{3 - 4 \left(\frac{d_{m\psi}}{d_{x\psi}} \right)^2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.11-2)$$

式中： ζ_{ψ} ——地基扭转向阻尼比；

$f_{m\psi}$ ——基础扭转振动的共振频率(Hz)；

$d_{m\psi}$ ——基础扭转振动共振峰点水平振动线位移(m)；

$d_{x\psi}$ ——为 0.707 基础扭转振动的共振频率所对应的水平振动线位移(m)。

4.5.12 基础扭转振动的参振总质量应按下列公式计算：

1 当为变扰力时：

$$m_{\psi} = \frac{12J_z}{l^2 + b^2} \quad (4.5.12-1)$$

$$J_z = \frac{m_0 e_0 e_c l_{\psi}}{d_{m\psi}} \cdot \frac{1}{2\zeta_{\psi} \sqrt{1 - \zeta_{\psi}^2}} \quad (4.5.12-2)$$

$$f_{n\psi} = f_{m\psi} \sqrt{1 - 2\zeta_{\psi}^2} \quad (4.5.12-3)$$

$$\omega_{n\psi} = 2\pi f_{n\psi} \quad (4.5.12-4)$$

2 当为常扰力时：

$$f_{n\psi} = \frac{f_{m\psi}}{\sqrt{1 - 2\zeta_{\psi}^2}} \quad (4.5.12-5)$$

$$J_z = \frac{M_{\psi} l_{\psi}}{d_{m\psi} \omega_{m\psi}^2} \cdot \frac{1 - 2\zeta_{\psi}^2}{2\zeta_{\psi} \sqrt{1 - \zeta_{\psi}^2}} \quad (4.5.11-6)$$

式中： m_{ψ} ——基础扭转振动的参振总质量(t)；

J_z ——基础对通过其重心轴的极转动惯量($t \cdot m^2$)；

$f_{n\psi}$ ——基础扭转振动无阻尼固有频率(Hz)；

$\omega_{m\psi}$ ——基础扭转振动固有圆频率(rad/s)；

M_{ψ} ——激振设备的扭转力矩(kN·m)；

e_c ——激振设备的水平扭转力矩力臂(m)；

l_{ψ} ——扭转轴至实测线位移点的距离(m)。

4.5.13 地基抗扭刚度和地基抗扭刚度系数应按下列公式计算：

$$K_{\psi} = J_z \omega_{n\psi}^2 \quad (4.5.13-1)$$

$$C_{\psi} = \frac{K_{\psi}}{I_z} \quad (4.5.13-2)$$

式中： K_{ψ} ——地基抗扭刚度(kN·m)；

C_{ψ} ——地基抗扭刚度系数(kN/m³)；

I_z ——基础底面对通过其形心轴的极惯性矩(m⁴)。

II 自由振动

4.5.14 地基竖向阻尼比应按下式计算：

$$\zeta_x = \frac{1}{2\pi n_f} \ln \frac{d_{11}}{d_{n+1}} \quad (4.5.14)$$

式中： d_{11} ——第 1 周的振动线位移(m)；

d_{n+1} ——第 $n+1$ 周的振动线位移(m)；

n_f ——自由振动周期数。

4.5.15 基础竖向振动的参振总质量应按下列公式计算(如图 4.5.15-1、图 4.5.15-2 所示)：

$$m_z = \frac{(1 + e_1) m_1 v_g}{d_{\max} 2\pi f_{nz}} e^{-\Phi} \quad (4.5.15-1)$$

$$\Phi = \frac{\tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta_z^2}}{\zeta_z}}{\frac{\sqrt{1 - \zeta_z^2}}{\zeta_z}} \quad (4.5.15-2)$$

$$f_{nz} = \frac{f_d}{\sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.5.15-3)$$

$$v_g = \sqrt{2gH_1} \quad (4.5.15-4)$$

$$e = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \quad (4.5.15-5)$$

$$H_2 = \frac{1}{2} g \left(\frac{t_0}{2} \right)^2 \quad (4.5.15-6)$$

式中： d_{\max} ——基础最大振动线位移(m)；

f_d ——基础有阻尼固有频率(Hz)；

v_g ——重锤自由下落时的速度(m/s)；

H_1 ——重锤下落高度(m)；

H_2 ——重锤回弹高度(m)；

e ——自然对数；

e_1 ——回弹系数；

m_1 ——重锤的质量(t)；

t_0 ——两次冲击的时间间隔(s)；

g ——重力加速度(m/s^2)。

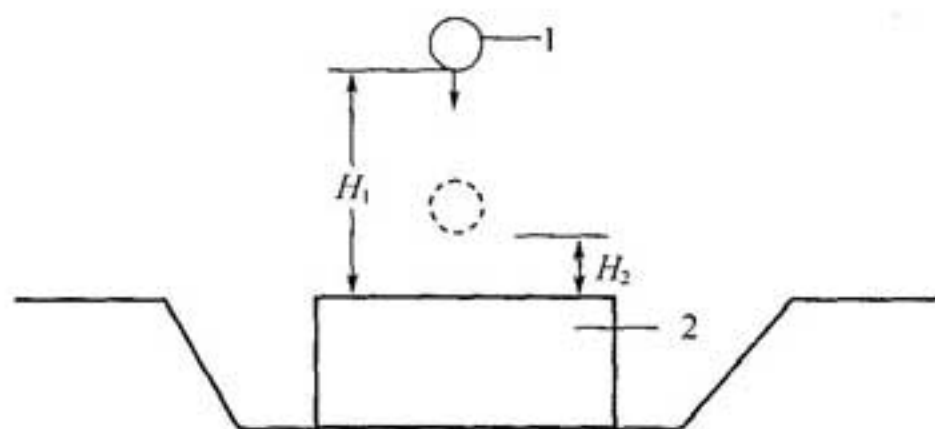


图 4.5.15-1 竖向自由振动

1—重锤；2—模型基础

H_1 —重锤下落高度； H_2 —重锤回弹高度

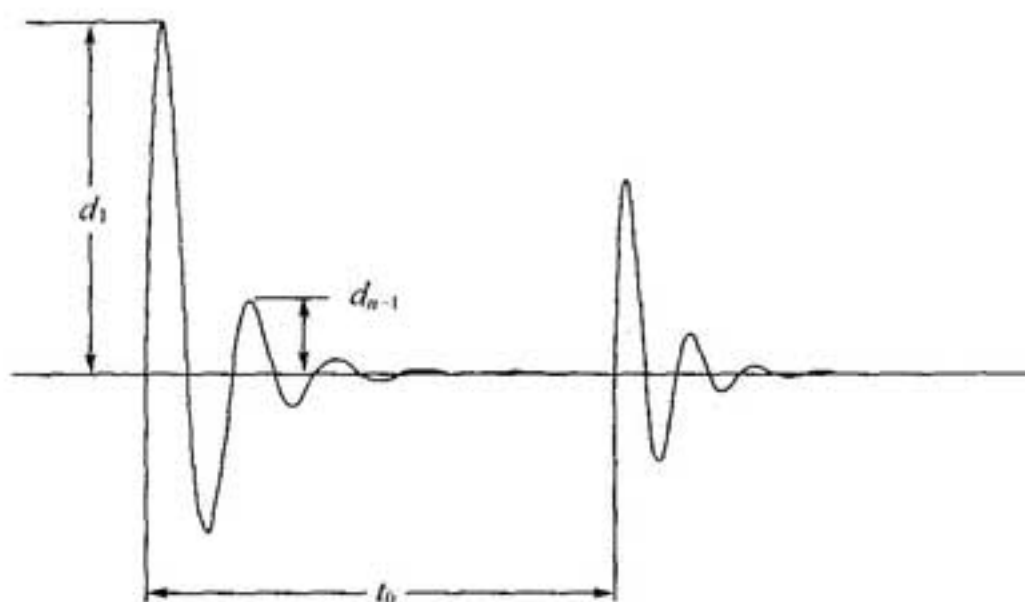


图 4.5.15-2 竖向自由振动波形

d_1 —第 1 周的振动线位移； d_{n+1} —第 $n+1$ 周的振动线位移； t_0 —两次冲击的时间间隔

4.5.16 自由振动的地基抗压刚度、抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度的计算应符合本规范第 4.5.5 条第 1 款的规定。

4.5.17 地基水平回转向第一振型阻尼比应按下式计算：

$$\zeta_{x\varphi_1} = \frac{1}{2\pi n_f} \ln \frac{d_{x\varphi_1}}{d_{x\varphi_{n+1}}} \quad (4.5.17)$$

式中： $d_{x\varphi_1}$ ——第一周的水平振动线位移(m)；

$d_{x\varphi_{n+1}}$ ——第 $n+1$ 周的水平振动线位移(m)。

4.5.18 地基抗剪刚度和地基抗弯刚度应按下列公式计算(如图 4.5.18-1、图 4.5.18-2 所示):

$$K_x = m_f \omega_{n1}^2 \left[1 + \frac{h_2}{h} \left(\frac{d_{x\varphi}}{d_b} - 1 \right) \right] \quad (4.5.18-1)$$

$$K_\varphi = J_c \omega_{n1}^2 \left(1 + \frac{h_2 h}{i^2} \cdot \frac{1}{\frac{d_{x\varphi}}{d_b} - 1} \right) \quad (4.5.18-2)$$

$$J_c = J + m_f h_2^2 \quad (4.5.18-3)$$

$$i = \sqrt{\frac{J_c}{m_f}} \quad (4.5.18-4)$$

$$\omega_{n1} = 2\pi f_{n1} \quad (4.5.18-5)$$

$$f_{n1} = \frac{f_{d1}}{\sqrt{1 - \zeta_{x\varphi 1}^2}} \quad (4.5.18-6)$$

$$d_b = d_{x\varphi} - \frac{|d_{z\varphi 1}| + |d_{z\varphi 2}|}{l_1} \cdot h \quad (4.5.18-7)$$

式中： m_f ——模型基础的质量(t)；

J_c ——基础对通过其底面形心轴的转动惯量($t \cdot m^2$)；

i ——基础对通过其底面形心轴的转动惯量与模型基础质量的比值平方根(m)；

$d_{x\varphi}$ ——基础顶面的水平振动线位移(m)；

$d_{z\varphi 1}$ ——基础顶面的第 1 个竖向传感器测得的振动线位移(m)；

$d_{z\varphi 2}$ ——基础顶面的第 2 个竖向传感器测得的振动线位移(m)；

ω_{n1} ——基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有圆频率(rad/s)；

d_b ——基础底面的水平振动线位移(m)；

f_{d1} ——基础水平回转耦合振动第一振型有阻尼固有频率(Hz)。

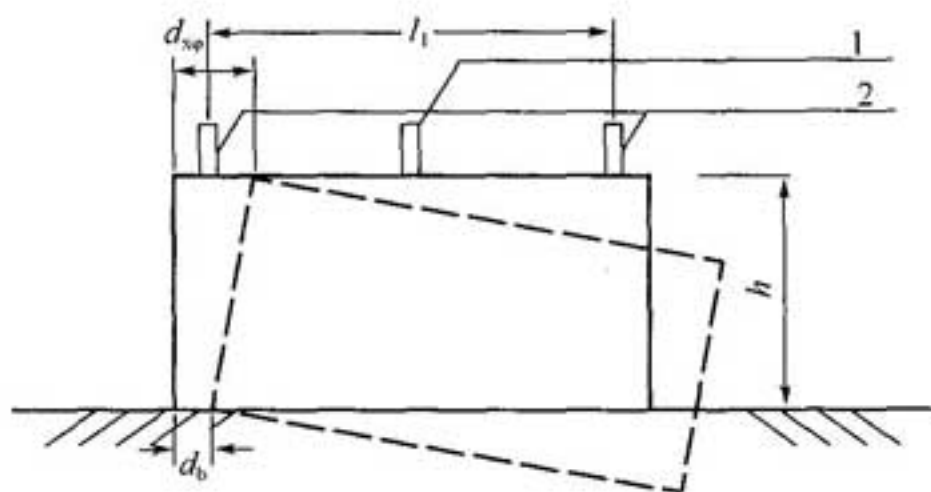


图 4.5.18-1 水平回转耦合振动

1—水平向传感器；2—竖向传感器

l_1 —两台竖向传感器的间距； h —基础高度；

$d_{x\varphi}$ —基础顶面的水平振动线位移； d_b —基础底面的水平振动线位移

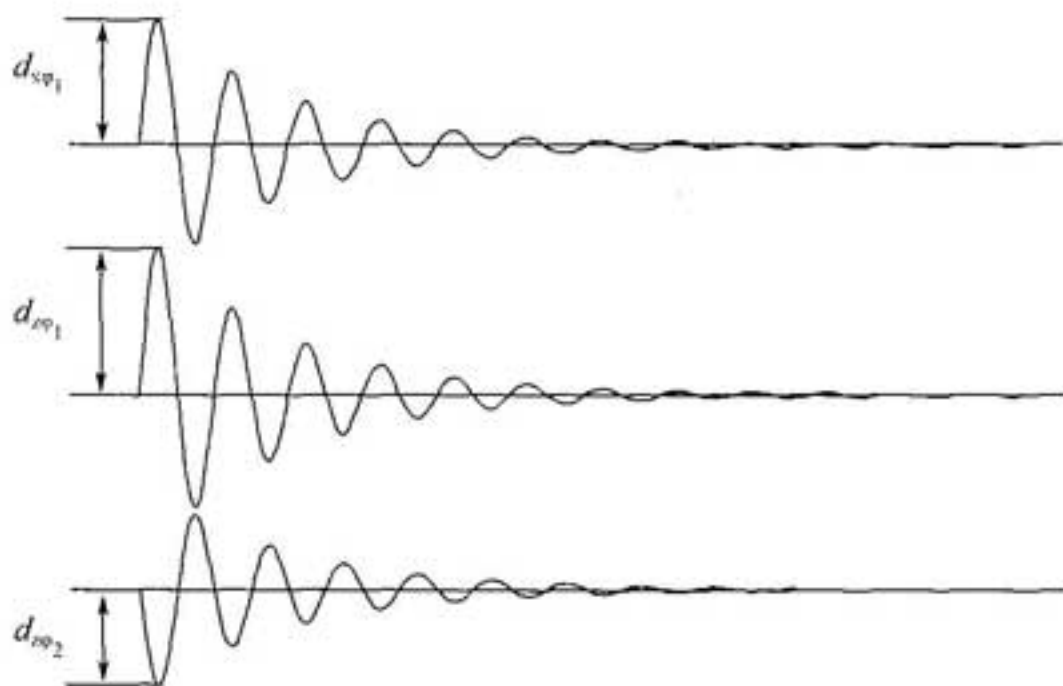


图 4.5.18-2 水平回转耦合振动波形

$d_{x\varphi_1}$ —第一周期的水平振动线位移；

$d_{x\varphi_1}$ —第 1 台传感器测试的第一周期的竖向振动线位移；

$d_{x\varphi_2}$ —第 2 台传感器测试的第一周期的竖向振动线位移

4.6 地基动力参数的换算

4.6.1 当模型基础现场实测得出的地基动力参数，用于机器基础的振动和隔振的设计时，应根据机器基础的设计情况换算成设计

采用的地基动力参数。

4.6.2 由明置块体基础测试取得的地基抗压、抗剪、抗弯、抗扭刚度系数以及由明置桩基础测试取得的抗剪、抗扭刚度系数,应乘以基础底面积与基础底面静压力的换算系数,换算系数应按下列式计算:

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{A_0}{A_d}} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_d}{P_0}} \quad (4.6.2)$$

式中: η ——基础底面积与基础底面静压力的换算系数;

A_0 ——模型基础底面积(m^2);

A_d ——设计基础底面积(m^2);

P_0 ——模型基础底面静压力(kPa);

P_d ——设计基础底面静压力(kPa)。

注:1 当 $A_d > 20\text{m}^2$ 时,应取 $A_d = 20\text{m}^2$;

2 当 $P_d > 50\text{kPa}$ 时,应取 $P_d = 50\text{kPa}$ 。

4.6.3 基础埋深对设计基础的地基抗压、抗剪、抗弯、抗扭刚度的提高系数应按下列公式计算:

$$\alpha_z = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{z0}}{K_{z0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.6.3-1)$$

$$\alpha_x = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{x0}}{K_{x0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.6.3-2)$$

$$\alpha_\varphi = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{\varphi 0}}{K_{\varphi 0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.6.3-3)$$

$$\alpha_\psi = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{\psi 0}}{K_{\psi 0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.6.3-4)$$

$$\delta_0 = \frac{h_1}{\sqrt{A_0}} \quad (4.6.3-5)$$

$$\delta_d = \frac{h_d}{\sqrt{A_d}} \quad (4.6.3-6)$$

式中: α_z ——基础埋深对地基抗压刚度的提高系数;

α_x ——基础埋深对地基抗剪刚度的提高系数；
 α_φ ——基础埋深对地基抗弯刚度的提高系数；
 α_ψ ——基础埋深对地基抗扭刚度的提高系数；
 K_{z0} ——明置模型基础的地基抗压刚度(kN/m)；
 K_{x0} ——明置模型基础的地基抗剪刚度(kN/m)；
 $K_{\varphi0}$ ——明置模型基础的地基抗弯刚度(kN·m)；
 $K_{\psi0}$ ——明置模型基础的地基抗扭刚度(kN·m)；
 K'_{z0} ——埋置模型基础的地基抗压刚度(kN/m)；
 K'_{x0} ——埋置模型基础的地基抗剪刚度(kN/m)；
 $K'_{\varphi0}$ ——埋置模型基础的地基抗弯刚度(kN·m)；
 $K'_{\psi0}$ ——埋置模型基础的地基抗扭刚度(kN·m)；
 δ_0 ——模型基础的埋深比；
 δ_d ——设计块体基础或桩基础的埋深比；
 h_t ——模型基础的埋置深度(m)；
 h_d ——设计基础的埋置深度(m)。

4.6.4 由明置模型基础测试的地基竖向、水平回转向第一振型和扭转向阻尼比,应按下列公式换算成设计采用的阻尼比:

$$\zeta_z^c = \zeta_{z0} \xi \quad (4.6.4-1)$$

$$\zeta_{x\varphi_1}^c = \zeta_{x\varphi_1 0} \xi \quad (4.6.4-2)$$

$$\zeta_\psi^c = \zeta_{\psi0} \xi \quad (4.6.4-3)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{m_r}}{\sqrt{m_{dr}}} \quad (4.6.4-4)$$

$$m_r = \frac{m_t}{\rho A_0 \sqrt{A_0}} \quad (4.6.4-5)$$

$$m_{dr} = \frac{m_d}{\rho A_d \sqrt{A_d}} \quad (4.6.4-6)$$

式中: ζ_{z0} ——明置模型基础的地基竖向阻尼比;

$\zeta_{x\varphi_1 0}$ ——明置模型基础的地基水平回转向第一振型阻尼比;

$\zeta_{\psi0}$ ——明置模型基础的地基扭转向阻尼比;

- ζ_z^c ——明置设计基础的地基竖向阻尼比；
 $\zeta_{x\varphi_1}^c$ ——明置设计基础的地基水平回转向第一振型阻尼比；
 ζ_ψ^c ——明置设计基础的地基扭转向阻尼比；
 ξ ——与基础的质量比有关的换算系数；
 m_f ——模型基础的质量(t)；
 m_d ——设计基础的质量(t)；
 m_r ——模型基础的质量比；
 m_{dr} ——设计基础的质量比；
 ρ ——地基的质量密度(t/m³)。

4.6.5 基础埋深对设计基础地基的竖向、水平回转向第一振型和扭转向阻尼比的提高系数,应按下列公式计算:

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\zeta'_{z0}}{\zeta_{z0}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \quad (4.6.5-1)$$

$$\beta_{x\varphi_1} = 1 + \left(\frac{\zeta'_{x\varphi_1 0}}{\zeta_{x\varphi_1 0}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \quad (4.6.5-2)$$

$$\beta_\psi = 1 + \left(\frac{\zeta'_{\psi 0}}{\zeta_{\psi 0}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \quad (4.6.5-3)$$

式中: β_z ——基础埋深对竖向阻尼比的提高系数;

$\beta_{x\varphi_1}$ ——基础埋深对水平回转向第一振型阻尼比的提高系数;

β_ψ ——基础埋深对扭转向阻尼比的提高系数;

ζ'_{z0} ——埋置测试的模型基础的地基竖向阻尼比;

$\zeta'_{x\varphi_1 0}$ ——埋置测试的模型基础的地基水平回转向第一振型阻尼比;

$\zeta'_{\psi 0}$ ——埋置测试的模型基础的地基扭转向阻尼比。

4.6.6 当计算机器基础的固有频率时,由明置模型基础测试取得的地基参加振动的当量质量,应乘以设计基础底面积与模型基础底面积的比值。

4.6.7 由2根或4根桩的桩基础测试取得的单桩抗压刚度,当设计的桩基础超过10根桩时,应分别乘以群桩效应系数0.75或0.90。

5 振动衰减测试

5.1 一般规定

5.1.1 符合下列情况之一时,宜采用振动衰减测试:

- 1 当设计的车间内同时设置低转速和高转速的机器基础,且需计算低转速机器基础振动对高转速机器基础的影响时;
- 2 当振动对邻近的精密设备、仪器、仪表可能产生有害的影响时;
- 3 公路、铁路交通运行对干线道路两侧建筑物可能有影响时;
- 4 当地基采用强夯处理或采用打入式桩基础产生的振动可能对周围建筑物有影响时。

5.1.2 振动衰减测试可采用测试现场附近的动力机器、公路交通、铁路交通等既有振源。当现场附近无上述振源时,可采用模型基础上的机械式激振设备作为振源。

5.1.3 用于振动衰减测试时的基础应埋置,并应符合本规范第4.1.5条的规定。

5.1.4 振动衰减测试用的设备和仪器,应按本规范第4.2节的规定选用。

5.1.5 振动衰减测试的模型基础、激振设备的安装和准备工作,应符合本规范第4.3节的规定。

5.1.6 振动衰减测试结果宜包括下列内容:

- 1 不同激振频率测试的地面振动线位移,随距振源的距离而变化的曲线;
- 2 不同激振频率计算的地基能量吸收系数,随距振源的距离而变化的曲线。

5.2 测试方法

5.2.1 振动衰减测试的测点,不应设在浮砂地、草地、松软的地层和冰冻层上。

5.2.2 当作周期性振动衰减测试时,激振设备的频率除应采用设计基础的机器扰力频率外,尚应做各种不同激振频率的振动衰减测试。

5.2.3 振动衰减测试的测点,应沿设计基础需要测试振动衰减的方向进行布置。

5.2.4 振动衰减测试点的传感器布置,在离基础边缘 5m 范围内应每隔 1m 布置 1 台;离基础边缘 5m~15m 范围内应每隔 2m 布置 1 台;离基础边缘 15m 以外,应每隔 5m 布置 1 台;测试半径应大于模型基础当量半径的 35 倍(如图 5.2.4 所示)。模型基础的当量半径应按下式计算:

$$r_0 = \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (5.2.4)$$

式中: r_0 ——模型基础的当量半径(m)。

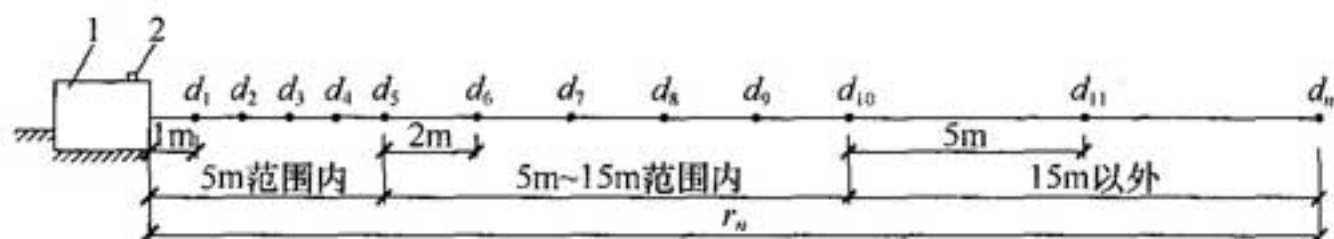


图 5.2.4 传感器布置示意图

1—模型基础;2—激振设备; r_n —测试半径

d_{1-5} —5m 范围内传感器编号; d_{6-10} —5m~15m 范围内传感器编号;

d_{11-n} —15m 以外传感器编号

5.2.5 对振源处的振动测试,传感器的布置应符合下列规定:

1 当振源为动力机器基础时,应将传感器置于测试基础顶面沿振动波传播方向轴线边缘上;

2 当振源为公路交通车辆时,可将传感器置于外距行车道外侧线 0.5m~1.0m 处;

3 当振源为铁路交通车辆时,可将传感器置于外距路轨外

0.5m~1.0m 处；

4 当振源为打入桩时，可将传感器置于距桩边 0.3m~0.5m 处；

5 当振源为重锤夯击土时，可将传感器置于夯击点边缘外 1.0m~2.0m 处。

5.3 数据处理

5.3.1 数据处理时，应绘制由各种激振频率测试的地面振动线位移随距振源的距离而变化的曲线图。

5.3.2 地基能量吸收系数，可按下式计算：

$$\alpha = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{1}{r_0 - r} \ln \frac{d_r}{d_0 \left[\frac{r_0}{r} \xi_0 + \sqrt{\frac{r_0}{r}} (1 - \xi_0) \right]} \quad (5.3.2)$$

式中： α ——地基能量吸收系数(s/m)；

f_0 ——激振频率(Hz)；

d_0 ——振源处的振动线位移(m)；

d_r ——距振源的距离为某处的地面振动线位移(m)；

ξ_0 ——无量纲系数，可按表 5.3.2 选用。

表 5.3.2 无量纲系数

土的名称	模型基础的当量半径(m)							
	≤0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	≥7.0
一般黏性土、 粉土、砂土	0.70~ 0.95	0.55	0.45	0.40	0.35	0.25~ 0.30	0.23~ 0.30	0.15~ 0.20
饱和软土	0.70~ 0.95	0.50~ 0.55	0.40	0.35~ 0.40	0.23~ 0.30	0.22~ 0.30	0.20~ 0.25	0.10~ 0.20
岩石	0.80~ 0.95	0.70~ 0.80	0.65~ 0.70	0.60~ 0.65	0.55~ 0.60	0.50~ 0.55	0.45~ 0.50	0.25~ 0.35

注：1 对于饱和软土，当地下水深 1.0m 及以下时，无量纲系数宜取较小值，1.0m~2.5m 时宜取较大值，大于 2.5m 时宜取一般黏性土无量纲系数值；

2 对于岩石覆盖层在 2.5m 以内时，无量纲系数宜取较大值，2.5m~6.0m 时宜取较小值，超过 6.0m 时，宜取一般黏性土无量纲系数值。

6 地脉动测试

6.1 一般规定

6.1.1 地脉动测试结果应包括下列内容：

- 1 脉动时程曲线；
- 2 功率谱图；
- 3 测试成果表。

6.2 设备和仪器

6.2.1 地脉动测试系统应符合下列规定：

- 1 通频带应选择 $1\text{Hz}\sim 40\text{Hz}$ ，信噪比应大于 80dB ；
- 2 低频特性应稳定可靠；
- 3 测试系统应与数据采集分析系统相配接。

6.2.2 传感器除可按本规范第 4.2.3 条的要求采用外，亦可采用频率特性和灵敏度等满足测试要求的加速度型传感器；对地下脉动测试用的速度型传感器，通频带应为 $1\text{Hz}\sim 25\text{Hz}$ ，并应密封防水。

6.2.3 放大器应符合下列规定：

1 当采用速度型传感器时，放大器应符合本规范第 4.2.4 条的规定；

2 当采用加速度型传感器时，应采用多通道适调放大器。

6.2.4 采集与分析系统应符合本规范第 4.2.5 条的规定。

6.3 测试方法

6.3.1 建筑场地的地脉动测点不应少于 2 个。

6.3.2 记录脉动信号时，距离观测点 100m 内应无人为振动

干扰。

6.3.3 测点宜选在天然地基土上,且宜在波速测试孔附近,传感器应按东西、南北、竖向三个方向布设。

6.3.4 地下脉动测试时,测点深度应根据工程需要进行布置。

6.3.5 脉动信号记录时,应根据所需频率范围设置低通滤波频率和采样频率,采样频率宜取 50Hz~100Hz,每次记录时间不应少于 15min,记录次数不宜少于 3 次。

6.4 数据处理

6.4.1 测试数据处理宜采用功率谱分析法。每个样本数据不应少于 1024 个点,采样频率宜取 50Hz~100Hz,并应进行加窗函数处理,频域平均次数不宜少于 32 次。

6.4.2 卓越频率的确定应符合下列规定:

- 1 卓越频率应采用频谱图中最大峰值所对应的频率;
- 2 当频谱图中出现多峰且各峰值相差不大时,宜在谱分析的同时,进行相关或互谱分析,并经综合评价后确定场地卓越频率。

6.4.3 场地卓越周期应按下式计算:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (6.4.3)$$

式中: T_p ——场地卓越周期(s);

f_p ——场地卓越频率(Hz)。

6.4.4 地脉动幅值的确定应符合下列规定:

- 1 脉动幅值应取实测脉动信号的最大幅值;
- 2 确定脉动信号的幅值时,应排除人为干扰信号的影响。

7 波速测试

7.1 单孔法

I 设备和仪器

7.1.1 测试振源应符合下列规定：

1 剪切波测试宜采用水平锤击上压重物的木板激振，当激振能量不足时，可采用弹簧激振法或定向爆破法等振源；

2 压缩波测试宜采用竖向锤击金属板激振，当激振能量不足时，可采用炸药震源或电火花震源等。

7.1.2 传感器宜采用三分量井下传感器，其固有频率不宜大于测试波主频率的 $1/2$ ；传感器应紧密固定于井壁上；放大器及记录系统应采用具有信号增强功能的多通道浅层地震仪，其记录时间的分辨率不应低于 1ms ；触发器性能应稳定，使用前应进行校正，其灵敏度宜为 0.1ms 。

7.1.3 单孔法测试亦可采用与静力触探装置安装在一起的波速测试探头。

II 测试方法

7.1.4 测试前的准备工作应符合下列规定：

1 测试孔应垂直，倾斜度允许偏差为 $\pm 2^\circ$ 。

2 测试孔不应出现塌孔或缩孔等现象；当使用套管时，应采用灌浆或填入砂土的方式使套管壁与周围土紧密接触。

3 当剪切波振源采用锤击上压重物的木板时，木板的长向中垂线应对准测试孔中心，孔口与木板的距离宜为 $1\text{m}\sim 3\text{m}$ ；板上所压重物不宜小于 500kg ；木板与地面应紧密接触。

4 当压缩波振源采用锤击金属板时，金属板距孔口的距离宜为 $1\text{m}\sim 3\text{m}$ 。

7.1.5 测试工作应符合下列规定：

1 测试时，应根据工程情况及地质分层，每隔 1m~3m 布置一个测点，并宜自下而上按预定深度进行测试。测点布置宜与地层的分界线一致，当有较薄夹层时，应适当调整使得其中至少布置有两个测点。

2 剪切波测试时，应沿木板纵轴方向分别打击木板的两端，并记录相位相反的两组剪切波波形。

3 最小测试深度不宜小于震源板至孔口之间的距离。

4 测试时应选择部分测点作重复测试，其数量不应少于测点总数的 10%。

III 数据处理

7.1.6 压缩波从振源到达测点的时间，应采用竖向传感器记录的波形确定；剪切波从振源到达测点的时间，应采用水平传感器记录的波形确定。

7.1.7 压缩波或剪切波从振源到达测点的时间，应按下列公式进行斜距校正：

$$T = \eta_s T_L \quad (7.1.7-1)$$

$$\eta_s = \frac{H + H_0}{\sqrt{L^2 + (H + H_0)^2}} \quad (7.1.7-2)$$

式中： T ——压缩波或剪切波从振源到达测点经斜距校正后的时间(s)；

T_L ——压缩波或剪切波从振源到达测点的实测时间(s)；

η_s ——斜距校正系数；

H ——测点的深度(m)；

H_0 ——振源与孔口的高差(m)，当振源低于孔口时， H_0 为负值；

L ——从板中心到测试孔的水平距离(m)。

7.1.8 由振源到达测点的距离应按测斜数据进行校正。

7.1.9 波速层的划分应结合地质情况按时距曲线上具有不同斜

率的折线段确定。

7.1.10 每一波速层的压缩波波速或剪切波波速应按下列公式计算：

$$v_p = \frac{\Delta H}{\Delta T_p} \quad (7.1.10-1)$$

$$v_s = \frac{\Delta H}{\Delta T_s} \quad (7.1.10-2)$$

式中： v_p ——压缩波波速(m/s)；

v_s ——剪切波波速(m/s)；

ΔH ——波速层的厚度(m)；

ΔT_p ——压缩波传到波速层顶面和底面的时间差(s)；

ΔT_s ——剪切波传到波速层顶面和底面的时间差(s)。

7.2 跨孔法

I 设备和仪器

7.2.1 跨孔法剪切波振源宜采用剪切波锤，亦可采用标准贯入试验装置；压缩波振源宜采用电火花或爆炸等。

7.2.2 跨孔法采用的传感器、放大器以及记录仪的要求，应符合本规范第 7.1.2 条的规定。

II 测试方法

7.2.3 场地与测点的布置应符合下列规定：

1 测试场地宜平坦；

2 测试孔宜设置一个振源孔和两个接收孔，并布置在一条直线上，孔的间距宜相等；

3 测试孔的间距在土层中宜取 2m~5m，在岩层中宜取 8m~15m；

4 根据工程情况及地质分层，测试孔中宜每隔 1m~2m 布置一个测点。

7.2.4 测试孔宜垂直，当测试深度大于 15m 时，应测量测试孔各段倾角和倾斜方向，测点间距不应大于 1m。

7.2.5 采用剪切波锤作振源时,振源孔应下套管,套管壁与孔壁应通过灌浆紧密接触;采用标准贯入试验装置作振源时,振源孔应采用泥浆护壁。

7.2.6 当振源采用剪切波锤时,现场测试应符合下列规定:

- 1 振源与接收孔内的传感器应设置在同一水平面上;
- 2 最浅测点的深度宜为 0.4 倍~1.0 倍的孔距,且不宜小于 2m;
- 3 测试时,振源和传感器应保持与孔壁紧贴;
- 4 测试工作结束后,应选择部分测点作重复观测,其数量不应少于测点总数的 10%;亦可采用振源孔和接收孔互换的方法进行复测。

III 数据处理

7.2.7 压缩波从振源到达测点的时间,应采用水平传感器记录的波形确定;剪切波从振源到达测点的时间,应采用竖向传感器记录的波形确定。

7.2.8 由振源到达每个测点的距离,应按测斜数据进行校正。

7.2.9 每个测试深度的压缩波波速及剪切波波速,应按下列公式计算:

$$v_p = \frac{\Delta S}{T_{P2} - T_{P1}} \quad (7.2.9-1)$$

$$v_s = \frac{\Delta S}{T_{S2} - T_{S1}} \quad (7.2.9-2)$$

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (7.2.9-3)$$

式中: T_{P1} ——压缩波到达第 1 个接收孔测点的时间(s);

T_{P2} ——压缩波到达第 2 个接收孔测点的时间(s);

T_{S1} ——剪切波到达第 1 个接收孔测点的时间(s);

T_{S2} ——剪切波到达第 2 个接收孔测点的时间(s);

S_1 ——由振源到第 1 个接收孔测点的距离(m);

S_2 ——由振源到第 2 个接收孔测点的距离(m);

ΔS ——由振源到两个接收孔测点的距离之差(m)。

7.3 面波法

I 设备和仪器

7.3.1 面波法测试应符合下列规定：

1 稳态面波法应采用稳态面波仪，瞬态面波法可采用多通道数字地震仪；

2 稳态面波法振源可采用大能量电磁激振器、机械激振器；瞬态面波法振源可根据测试深度和现场环境选择锤击振源、夯击振源、爆炸振源等。

7.3.2 面波法测试采用的传感器、放大器和分析系统应符合下列规定：

1 仪器动态范围不应低于 120dB，模/数转换位数不宜小于 16 位；

2 放大器的通频带应满足采集面波频率范围的要求；

3 传感器应具有相同的频响特性，固有频率应满足探测深度的需要；

4 同一次现场测试选用的传感器之间的固有频率差不应大于 0.1Hz，灵敏度差和阻尼系数差不应大于 10%。

II 测试方法

7.3.3 面波法的现场测试应符合下列规定：

1 激振器与传感器的安置应与地面紧密接触，并使其保持竖直状态。

2 检波点距或道间距，不宜大于最小勘探深度所需波长的 1/2；最小偏移距，可与检波点距或道间距相等。

3 采样点的间隔应满足工程项目的要求。

4 出现异常或发现畸变曲线时应重复测试。

7.3.4 当地具有钻孔资料时面波测点宜靠近钻孔。

III 数据处理

7.3.5 面波法测试数据的处理应符合下列规定：

1 处理时应剔除明显畸变点、干扰点,并将全部数据按频率顺序排序;

2 对数据进行预处理后,应准确区分面波和体波,正确绘制频散曲线;

3 应通过对已知的钻孔等资料对曲线的“之”字形拐点和曲率变化进行分析,求出对应层的面波相速度,并根据换算深度绘制速度-深度曲线。

7.3.6 瑞利波波速应按下式计算:

$$v_R = \frac{2\pi f \Delta l}{\varphi} \quad (7.3.6)$$

式中: v_R ——瑞利波波速(m/s);

φ ——两台传感器接收到的振动波之间的相位差(rad);

Δl ——两台传感器之间的水平距离(m);

f ——振源的频率(Hz)。

7.3.7 地基的剪切波速应按下列公式计算:

$$v_s = \frac{v_R}{\eta_\mu} \quad (7.3.7-1)$$

$$\eta_\mu = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \quad (7.3.7-2)$$

式中: η_μ ——与泊松比有关的系数;

μ ——地基的泊松比。

7.4 弯曲元法

I 设备和仪器

7.4.1 弯曲元法测试设备和仪器应包括激发元、接收元、函数发生器、信号放大系统和示波器,并应符合下列规定:

1 输出的激发信号电压允许偏差为 $\pm 10\text{V}$;

2 示波器最小分辨率不宜小于 2ns ;

3 信号发生器发出的波形信号,升压时间延迟不宜超过 $1\mu\text{s}$ 。

7.4.2 弯曲元法测试设备可安装在室内土工仪器中,也可在现场

试验中应用。

II 测试方法

7.4.3 试样安装应与弯曲元直接紧密接触,滤纸或其他保护膜应为弯曲元的插入留出空隙。

7.4.4 弯曲元测试时,应根据试样的种类,调整弯曲元的加载输出波形、功率、频率,并应调整示波器的放大倍数,且使示波器显示的波形清晰。

III 数据处理

7.4.5 波的传播时间宜通过发射波第一个零交叉点与接收波第一个零交叉点的时间差确定(如图 7.4.5 所示)。

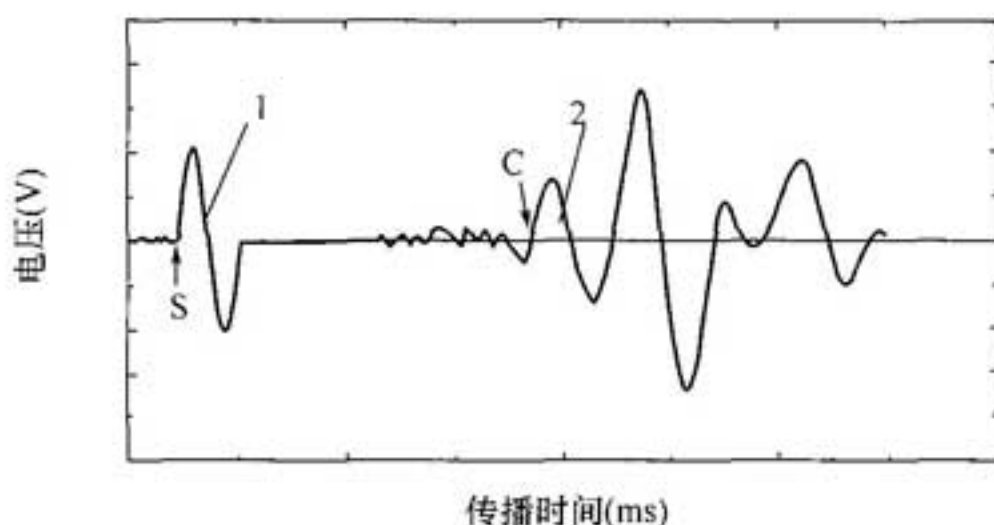


图 7.4.5 时域初达波法示意图

1—发射波;2—接收波;S—发射波第一个零交叉点;C—接收波第一个零交叉点

7.4.6 波的传播距离应取激发元与接收元之间的距离。室内测试时,应由测试时的试样高度减去弯曲元插入试样的深度确定。试样高度应根据土样的初始高度以及轴向应变确定。

7.4.7 土样的剪切波速和压缩波速应按下列公式计算:

$$v_s = L_w / T_s \quad (7.4.7-1)$$

$$v_p = L_w / T_p \quad (7.4.7-2)$$

式中: L_w ——波的传播距离(m);

T_s ——剪切波传播时间(s);

T_p ——压缩波传播时间(s)。

8 循环荷载板测试

8.1 一般规定

8.1.1 循环荷载板测试,除应符合本规范第 3.0.2 条的规定外,尚应具备拟建基础的位置和基底标高等资料。

8.1.2 循环荷载板测试结果应包括下列内容:

- 1 测试的各种曲线图;
- 2 地基弹性模量;
- 3 地基抗压刚度系数的测试值及经换算后的设计值。

8.2 设备和仪器

8.2.1 加荷装置可采用载荷台或采用反力架、液压和稳压等设备。

8.2.2 载荷台或反力架应稳固、安全可靠,其承受荷载能力应大于最大测试荷载的 1.5 倍。

8.2.3 当采用千斤顶加荷时,其反力支撑可采用荷载台、地锚、坑壁斜撑和平洞顶板支撑。

8.2.4 测试地基变形的仪器,可采用百分表或位移传感器,测量精度不应低于 0.01mm。

8.3 测试前的准备工作

8.3.1 承压板应具有足够的刚度,其形状可采用正方形或圆形;承压板面积不宜小于 0.5m^2 ;对密实土层,承压板面积可采用 0.25m^2 。

8.3.2 试坑应设置在设计基础邻近处,其土层结构宜与设计基础的土层结构相同,应保持试验土层的原状结构和天然湿度,试坑底

标高宜与设计基础底标高一致。

8.3.3 试坑底面的宽度应大于承压板的边长或直径的 3 倍。试坑底面应保持水平面,并宜在承压板下用中、粗砂层找平,其厚度宜取 10mm~20mm。

8.3.4 荷载作用点与承压板的中心应在同一条竖直线上。

8.3.5 沉降观测装置的固定点应设置在变形影响区以外。

8.4 测试方法

8.4.1 循环荷载的大小和测试次数应根据设计要求和地基性质确定。

8.4.2 荷载应分级施加,第一级荷载应取试坑底面土的自重,变形稳定后再施加循环荷载,其增量可按表 8.4.2 采用。

表 8.4.2 各类土的循环荷载增量

土的名称	循环荷载增量(kPa)
淤泥、流塑黏性土、松散砂土	≤ 15
软塑黏性土、新近堆积黄土,稍密的粉、细砂	15~25
可塑~硬塑黏性土、黄土,中密的粉、细砂	25~50
坚硬黏性土,密实的中、粗砂	50~100
密实的碎石土、风化岩石	100~150

8.4.3 测试方法可采用单荷级循环法或多荷级循环法。每一荷级反复循环次数黏性土宜为 6 次~8 次,砂性土宜为 4 次~6 次。

8.4.4 每级荷载的循环时间,加荷与卸荷均宜为 5min,并应同时观测变形量。

8.4.5 加荷时地基变形量稳定的标准应符合下列规定:

- 1 在静力荷载作用下,连续 2h 观测中,每小时变形量不应超

过 0.1mm;

2 在循环荷载作用下,最后一次循环测得的弹性变形量与前一次循环测得的弹性变形量的差值不应大于 0.05mm。

8.4.6 每一级荷载作用下的弹性变形宜取最后一次循环卸载的弹性变形量。

8.5 数据处理

8.5.1 根据测试数据应绘制下列曲线图:

- 1 应力-时间曲线图;
- 2 地基变形量-时间曲线图;
- 3 地基变形量-应力曲线图;
- 4 地基弹性变形量-应力曲线图。

8.5.2 地基弹性变形量应按下式计算:

$$S_e = S - S_p \quad (8.5.2)$$

式中: S_e ——地基弹性变形量(mm);

S ——加荷时地基变形量(mm);

S_p ——卸荷时地基塑性变形量(mm)。

8.5.3 当地基弹性变形量-应力散点图不能连成一条直线时,应根据各级荷载测得的地基弹性变形量,按最小二乘法进行回归分析计算,得出地基弹性变形量-应力直线图。

8.5.4 地基弹性模量,可根据地基弹性变形量-应力直线图(如图 8.5.4 所示),按下式计算:

$$E = \frac{(1 - \mu^2)Q}{DS_{el}} \quad (8.5.4)$$

式中: E ——地基弹性模量(MPa);

D ——承压板直径(mm);

Q ——承压板上最后一级加载后的总荷载(N);

S_{el} ——在地基弹性变形量-应力直线图上,相应于最后一级加载的地基弹性变形量(mm)。

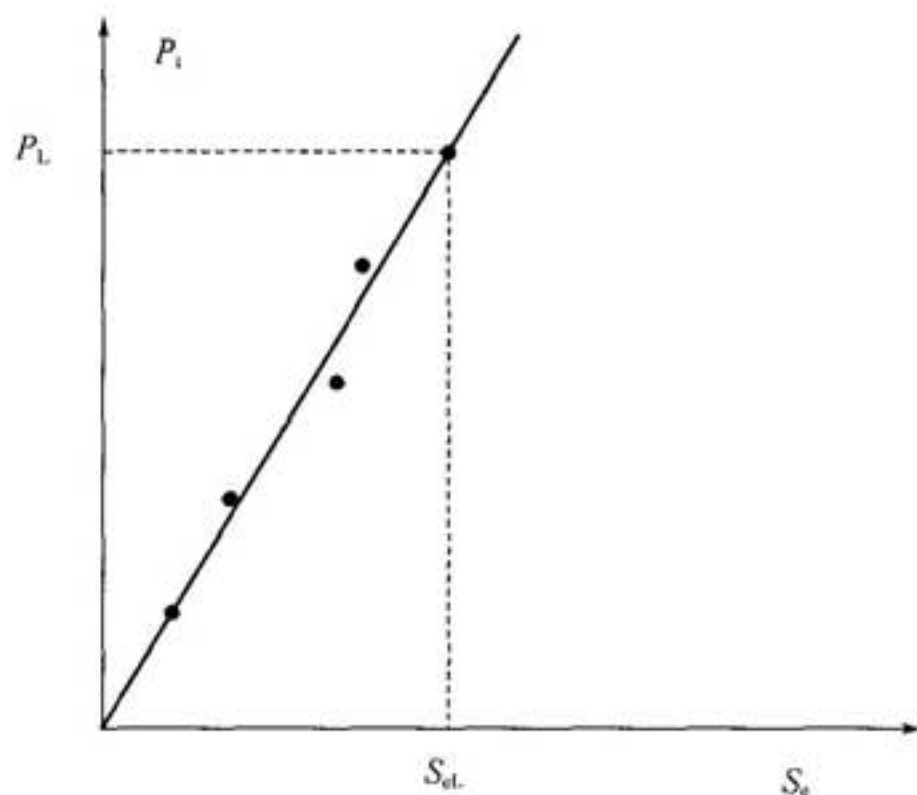


图 8.5.4 地基弹性变形量-应力直线示意图

P_i —应力; P_L —最后一级加载作用下, 承压板底的总静应力(kPa);

S_e —地基弹性变形量; S_{eL} —最后一级加载的地基弹性变形量

8.5.5 地基抗压刚度系数宜按下式计算:

$$C_z = \frac{P_L}{S_{eL}} \quad (8.5.5)$$

式中: P_L ——最后一级加载作用下, 承压板底的总静应力(kPa)。

8.5.6 基础设计时, 按本章第 8.5.5 条计算的地基抗压刚度系数, 应乘以换算系数, 换算系数应按本规范第 4.6 节的有关规定确定。

9 振动三轴测试

9.1 一般规定

9.1.1 振动三轴测试可提供下列动力特性参数：

1 应变幅大于 10^{-4} 条件下，土试样的动弹性模量、动剪切模量和阻尼比；

2 土试样的动强度、抗液化强度和动孔隙水压力。

9.1.2 振动三轴测试报告应包括下列内容：

1 动弹性模量比、阻尼比与轴向应变幅的关系曲线，动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的关系曲线；

2 动强度比与破坏振次的关系曲线；

3 动荷载下总应力抗剪强度与潜在破坏面上初始应力的关系以及相应的总应力抗剪强度指标；

4 当需提供动孔隙水压力特性的测试资料时，宜提供动孔压比与振次比的关系曲线，亦可提供动孔压比与动剪应力比的关系曲线。

9.2 设备和仪器

9.2.1 当采用电磁式、液压式等驱动型式的振动三轴仪时，其静力加荷系统和孔隙水压力测量系统应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

9.2.2 振动三轴测试的主机动力加载系统，除正弦波形外，应具有施加三角波形和给定数字信号波形等多种型式动荷载或动应变的功能。

9.2.3 振动三轴测试主机动力加载系统，当以正弦波形式激振时，实际波形应对称，且其拉、压两个半周的幅值和持时的相对偏

差均不宜大于 10%。

9.2.4 振动三轴仪实测的应变幅范围应满足工程动力分析的需要。

9.2.5 用于测试荷载、土样变形和孔隙水压力等参数的动态传感器,应符合量程、频响特性和精度等方面的技术要求。记录仪应采用数字采集系统。

9.3 测试方法

9.3.1 试样的制备、安装与饱和方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

9.3.2 天然地基的试样制备宜采用原状土,扰动土和人工地基土的试样制备,其干密度等指标宜与工程现场条件相近。

9.3.3 在周围压力作用下的孔隙水压力系数,饱和砂土、粉土试样不应小于 0.98,饱和黏性土试样不应小于 0.95。

9.3.4 试样的固结应力条件,应根据地基土的现场应力条件确定。每一种试样的初始剪应力比可选用 1 个~3 个,每一个初始剪应力比相对应的侧向固结应力可采用 1 个~3 个,每一个侧向固结应力下可采用 3 个~4 个试样分别选用不同的振次或动应力幅进行试验。

9.3.5 测试时应使试样在静力作用下固结稳定后,再在不排水条件下施加动应力或动应变。

9.3.6 测试试样动弹性模量和阻尼比时,应在给定振动频率的轴向动应力作用下测得试样的动应力-动应变滞回曲线,动应力的作用振次不宜大于 5 次。

9.3.7 测试动弹性模量、动剪切模量和阻尼比随应变幅的变化时,宜逐级施加动应变幅或动应力幅,后一级的振动线位移可比前一级增大 1 倍。在同一试样上选用允许施加的动应变幅或动应力幅的级数时,应避免孔隙水压力明显升高。

9.3.8 当不能同时测试动剪切模量和动弹性模量时,可根据地基的泊松比取值,由动剪切模量与动弹性模量之间进行换算。

9.3.9 测试试样的动强度或抗液化强度时,施加的动应力或动应变的波形或频率,应与工程对象所受动力荷载的波形或频率相近。

9.3.10 测试时应在试样上施加轴向动应力或动应变,并应记录应力、应变和孔隙水压力的变化曲线,直至试样达到所规定的破坏标准。

9.3.11 试样动强度的破坏标准,可在动应变幅 $2.5 \times 10^{-2} \sim 10.0 \times 10^{-2}$ 范围内确定。可液化土的抗液化强度试验的破坏标准,可采用初始液化或 2.5×10^{-2} 的动应变幅值。

9.3.12 土试样动强度的等效破坏振次,应根据工程对象承受的循环荷载性质确定。实测破坏振次的分布范围应覆盖工程对象的等效破坏振次。

9.4 数据处理

9.4.1 动应力、动应变和孔隙水压力等物理量,应根据仪器的标定系数及试样尺寸,对测试记录进行换算。

9.4.2 试样动弹性模量和阻尼比,应根据记录的试样轴向动应力-动应变滞回曲线(如图 9.4.2 所示),按下列公式计算:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \quad (9.4.2-1)$$

$$\zeta_{dz} = \frac{A_s}{\pi A_t} \quad (9.4.2-2)$$

式中: E_d ——试样动弹性模量(kPa);

σ_d ——试样轴向动应力幅(kPa);

ϵ_d ——试样动轴应变幅;

ζ_{dz} ——试样轴向振动阻尼比(%);

A_s ——轴向动应力-动应变滞回圈的面积(如图 9.4.2 中阴影部分所示,kPa);

A_t ——轴向动应力-动应变滞回曲线图中直角三角形面积(如图 9.4.2 所示 abc 的面积,kPa)。

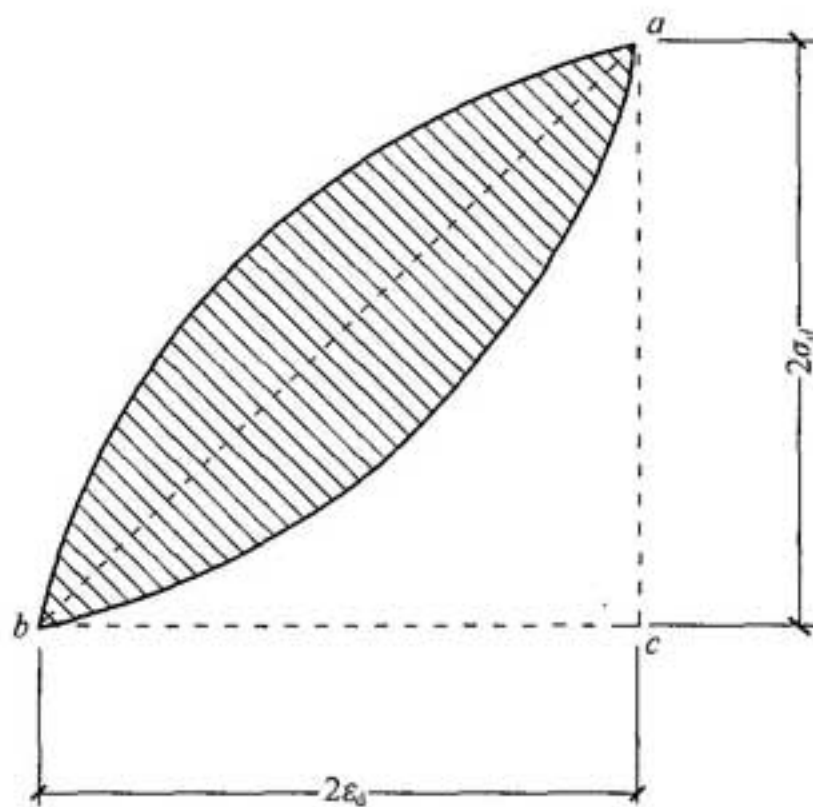


图 9.4.2 轴向动应力-动应变滞回曲线图

ϵ_d —试样动轴应变幅; σ_d —试样轴向动应力幅

9.4.3 试样动剪切模量与试样动弹性模量、试样动剪应力与试样轴向动应力幅、试样动剪应变幅与试样动轴应变幅之间的换算应按下列公式计算:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad (9.4.3-1)$$

$$\tau_d = \frac{\sigma_d}{2} \quad (9.4.3-2)$$

$$\gamma_d = \epsilon_d(1 + \mu_d) \quad (9.4.3-3)$$

式中: G_d ——试样动剪切模量(kPa);

μ_d ——试样的泊松比;

τ_d ——试样动剪应力幅(kPa);

γ_d ——试样动剪应变幅。

9.4.4 对于每一个固结应力条件,应采用半对数坐标绘制动弹性模量比、阻尼比与轴向应变幅对数值的关系曲线,或动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅对数值的关系曲线(如图 9.4.4 所示)。

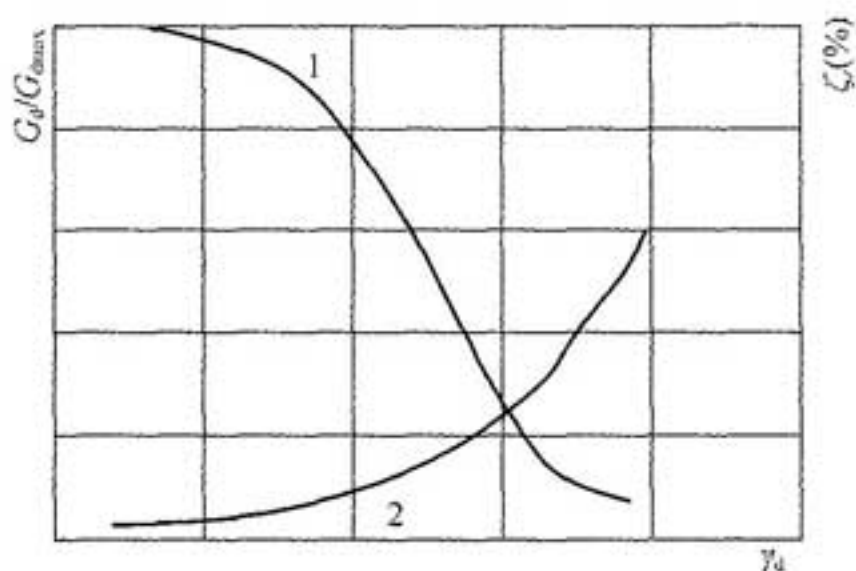


图 9.4.4 动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的关系曲线示意图

1—动剪切模量比；2—阻尼比

G_d —试样动剪切模量； G_{dmax} —最大动剪切模量；

ζ —试样轴向振动阻尼比； γ_d —试样动剪应变幅

9.4.5 在测试的动应力、动应变和动孔隙水压力时程曲线上，应按本规范第 9.3.11 条规定确定的破坏标准来确定等效破坏振次；相应于该等效破坏振次的试样，在 45° 面上试样的动强度比，应按下列公式计算：

$$R_f = \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} \quad (9.4.5-1)$$

$$\text{二维时：}\sigma_c = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c})/2 \quad (9.4.5-2)$$

$$\text{三维时：}\sigma_c = (\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c})/3 \quad (9.4.5-3)$$

式中： R_f ——试样 45° 面上的动强度比；

σ_c ——试样平均固结应力(kPa)；

σ_{1c} ——试样初始轴向固结应力(kPa)；

σ_{3c} ——试样侧向固结应力(kPa)。

9.4.6 对在同一固结应力条件下多个试样的测试结果，应绘制动强度比与破坏振次对数值的关系曲线图(如图 9.4.6 所示)。该关系曲线相应于某一初始剪应力比和某一侧向固结应力，应按工程要求的等效破坏振次，在该曲线上确定相应的动强度比。

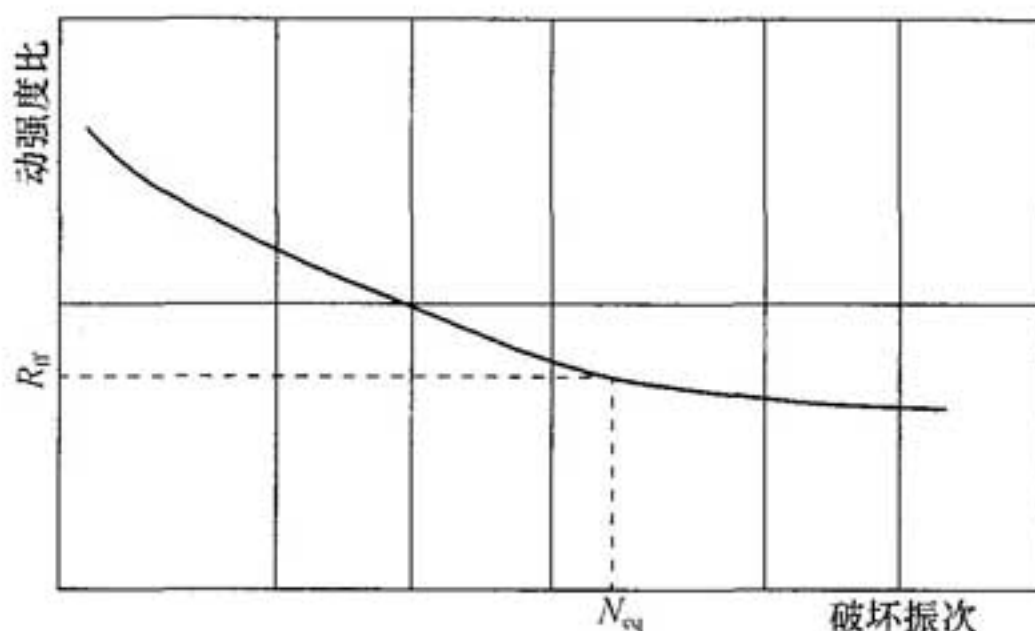


图 9.4.6 动强度比与破坏振次的关系曲线示意图

N_{eq} —等效破坏振次； R_{ff} —对应于等效破坏振次的动强度比

9.4.7 试样潜在破坏面上初始法向有效应力和潜在破坏面上的初始剪应力以及相应于工程等效破坏振次的动强度，宜按下列公式计算：

(1) 受压破坏时：

$$\sigma_{f0} = \frac{\sigma_{1c} + \sigma_{3c}}{2} - \frac{(\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) \sin \varphi_d}{2} \quad (9.4.7-1)$$

$$\tau_{f0} = \frac{(\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) \cos \varphi_d}{2} \quad (9.4.7-2)$$

$$\tau_{fd} = R_{ff} \sigma_c \cos \varphi_d \quad (9.4.7-3)$$

$$\tau_{fs} = \tau_{f0} + \tau_{fd} \quad (9.4.7-4)$$

$$\alpha_0 = \frac{\tau_{f0}}{\sigma_{f0}} \quad (9.4.7-5)$$

式中： σ_{f0} ——潜在破坏面上的初始法向应力(kPa)；

φ_d ——试样的动内摩擦角(°)；

τ_{f0} ——潜在破坏面上的初始剪应力(kPa)；

τ_{fd} ——相应于工程等效破坏振次的动强度(kPa)；

R_{ff} ——对应于等效破坏振次的动强度比；

τ_{fs} ——潜在破坏面上的总应力抗剪强度(kPa)；

α_0 ——潜在破坏面上的初始剪应力比。

(2)受拉破坏时:

$$\sigma_{f0} = \frac{\sigma_{1c} + \sigma_{3c}}{2} + \frac{(\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) \sin \varphi_d}{2} \quad (9.4.7-6)$$

$$\tau_{fs} = \tau_{fd} - \tau_{f0} \quad (9.4.7-7)$$

9.4.8 当潜在破坏面上的初始剪力比等于零时,饱和砂土相应于工程等效破坏振次的动强度,应按下式计算:

$$\tau_{fd} = C_r R_{ff} \sigma_c \quad (9.4.8)$$

式中: C_r ——测试条件修正系数,其值与静止侧压力系数 k_0 有关,当 $k_0 = 0.4$ 时 C_r 取 0.57; 当 $k_0 = 1.0$ 时 C_r 应在 0.9~1.0 范围内取值。

9.4.9 试样受压破坏与受拉破坏,其轴向动应力幅应按下列表达式进行判别:

1 受压破坏:

$$\sigma_d \leq \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{\sin \varphi_d} \quad (9.4.9-1)$$

2 受拉破坏:

$$\sigma_d > \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{\sin \varphi_d} \quad (9.4.9-2)$$

9.4.10 对应于一定等效破坏振次下潜在破坏面上的总应力抗剪强度,应绘制潜在破坏面上的总应力抗剪强度与潜在破坏面上初始法向有效应力之间的关系曲线,并应按下式计算:

$$\tau_{fs} = c_d + \sigma_{f0} \tan \varphi_d \quad (9.4.10)$$

式中: c_d ——总应力抗剪强度中的动凝聚力(kPa)。

9.4.11 对于不同的固结应力条件,应分别绘制各自潜在破坏面上的总应力抗剪强度曲线,宜采用潜在破坏面上的初始剪应力比来确定固结应力条件。

9.4.12 动孔隙水压力宜取记录时程曲线上的峰值;根据工程需要,也可取残余动孔隙水压力值。

9.4.13 对于同一初始剪应力比所测试的数据,宜绘制出动孔压比与振次比的关系曲线(图 9.4.13);不同振次时的振次比与动孔

压比应根据记录的动孔隙水压力时程曲线与破坏振次确定。

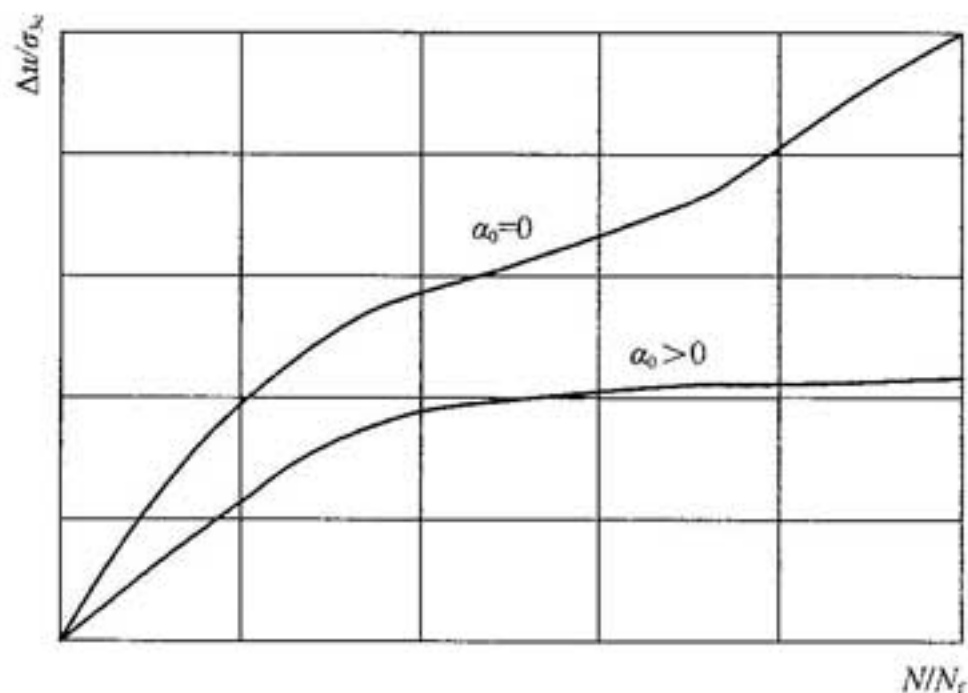


图 9.4.13 动孔压比与振次比的关系曲线示意图

Δu —试样孔隙水压力； σ_{3c} —试样侧向固结应力；

α_0 —潜在破坏面上的初始剪应力比； N —振次； N_f —破坏振次

9.4.14 对于潜在破坏面初始剪应力比相同的各个试验，可绘制固定振次作用下的动孔压比与动剪应力比的关系曲线(图 9.4.14)，也可根据工程需要，绘制不同初始剪应力比与不同振次作用下的关系曲线。

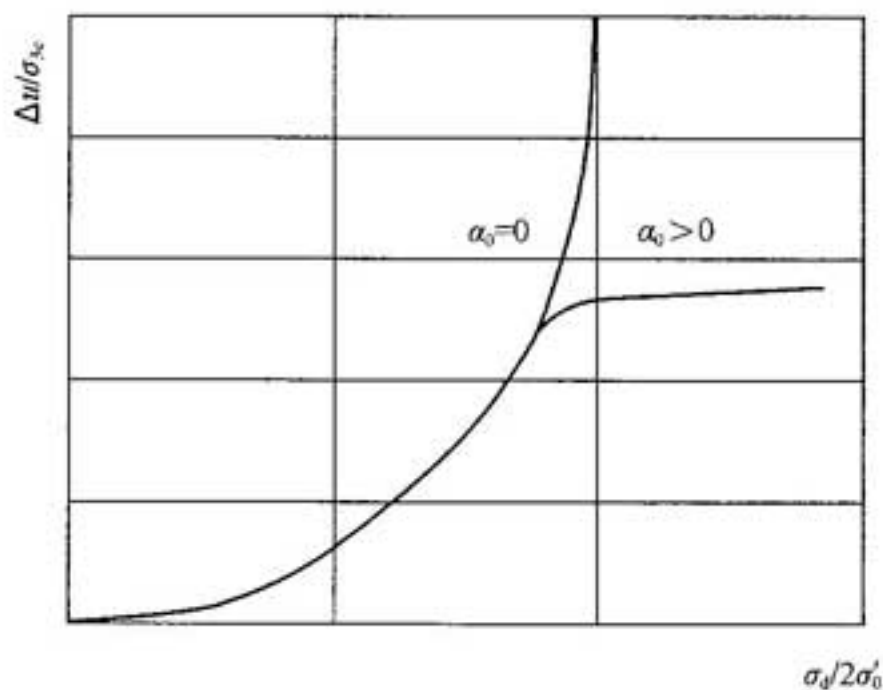


图 9.4.14 动孔压比与动剪应力比的关系曲线示意图

Δu —试样孔隙水压力； σ_{3c} —试样侧向固结应力； α_0 —潜在破坏面上的初始剪应力比；

σ_d —试样轴向动应力幅； σ'_0 —试样平均有效主应力

10 共振柱测试

10.1 一般规定

10.1.1 共振柱测试报告宜包括下列内容：

- 1 最大动剪切模量或最大动弹性模量与初始平均固结应力的关系；
- 2 动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的关系曲线，或动弹性模量比、阻尼比与轴应变幅的关系曲线。

10.2 设备和仪器

10.2.1 共振柱测试设备可采用扭转向激振和轴向激振的共振柱仪。

10.2.2 共振柱测试的主机静力加荷系统和孔隙水压力测量系统，应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

10.2.3 共振柱测试设备和仪器的实测应变幅范围以及各种动态传感器，应符合本规范第 9.2.4 条和第 9.2.5 条的规定。

10.3 测试方法

10.3.1 试样的制备、安装、饱和、固结的方法，应符合本规范第 9.3.1 条～第 9.3.5 条的规定。

10.3.2 动剪切模量或动弹性模量的测试，宜采用稳态强迫振动法，亦可采用自由振动法；阻尼比的测试，宜采用自由振动法。

10.3.3 采用稳态强迫振动法测试时，在轴向动应力幅一定的条件下，宜由低向高逐渐增大振动频率并观测系统的线位移变化，直到出现共振。

10.3.4 采用自由振动法测试时,宜对试样施加瞬时扭矩或力,然后立即释放任其自由振动,并同时记录试样变形随时间的衰减过程。

10.3.5 测试动剪切模量或动弹性模量和阻尼比随应变幅的变化关系时,宜逐级施加动应力幅或动应变幅,后一级的振动线位移可比前一级增大1倍。在同一试样上选用容许施加的动应力幅或动应变幅的级数时,应避免孔隙水压力明显升高,同时试样的应变幅不宜超过 10^{-4} 。

10.3.6 当不能同时测试动剪切模量和动弹性模量时,可根据其泊松比,按本规范第9.4.3条有关规定换算。

10.4 数据处理

10.4.1 动应力、动应变和动孔隙水压力等动力参数,应按仪器的的标定系数及试样尺寸,由电测记录值进行换算。

10.4.2 当试样在一端固定、另一端为扭转激振的共振柱仪上测试时,试样的剪应变幅应按下列公式计算:

1 当为圆柱体试样时:

$$\gamma_d = \frac{\theta D_s}{3h_s} \quad (10.4.2-1)$$

2 当为空心圆柱体试样时:

$$\gamma_d = \frac{\theta(D_1 + D_2)}{4h_s} \quad (10.4.2-2)$$

式中: θ ——试样扭转角位移(rad);

D_s ——试样直径(m);

h_s ——试样高度(m);

D_1 ——空心圆柱体试样的外径(m);

D_2 ——空心圆柱体试样的内径(m)。

10.4.3 在扭转激振的共振柱仪上测试时,试样的动剪切模量应按下式计算:

$$G_d = \rho_s \left(\frac{2\pi h_s f_t}{F_t} \right)^2 \quad (10.4.3)$$

式中： ρ_s ——试样的质量密度(kg/m³)；

f_t ——试样系统扭转振动的共振频率(Hz)；

F_t ——扭转向无量纲频率因数，由第 10.4.4 条确定。

10.4.4 扭转向无量纲频率因数应按下列公式计算：

$$F_t \cdot \tan F_t = \frac{1}{T_t} \quad (10.4.4-1)$$

$$T_t = \frac{J_n}{J_s} \left[1 - \left(\frac{f_{nt}}{f_t} \right)^2 \right] \quad (10.4.4-2)$$

$$J_s = \frac{m_s d_s^2}{8} \quad (10.4.4-3)$$

式中： J_s ——试样的转动惯量(kg·m²)；

m_s ——试样的总质量(kg)；

J_n ——试样顶端激振压板系统的转动惯量(kg·m²)，由仪器标定方法确定；

f_{nt} ——无试样时激振压板系统扭转向共振频率(Hz)，激振端无弹簧-阻尼器时取 0。

10.4.5 扭转向阻尼比应按下列公式计算：

$$\zeta_t = \frac{\delta_t (1 + S_t) - \delta_{nt} S_t}{2\pi} \quad (10.4.5-1)$$

$$\delta_t = \frac{1}{n_t} \ln \left(\frac{d_{t1}}{d_{t(n+1)}} \right) \quad (10.4.5-2)$$

$$S_t = \frac{J_n}{J_s} \left(\frac{f_{nt} F_t}{f_t} \right)^2 \quad (10.4.5-3)$$

式中： ζ_t ——试样扭转向阻尼比；

δ_t ——试样系统扭转自由振动的对数衰减率；

δ_{nt} ——无试样时激振压板系统扭转自由振动的对数衰减率；

S_t ——试样系统扭转向能量比。

10.4.6 试样在轴向激振的共振柱仪上测试时，轴向应变幅和动

弹性模量,应按下列公式计算:

$$\epsilon_d = \frac{d_z}{h_s} \quad (10.4.6-1)$$

$$E_d = \rho \left(\frac{2\pi h_s f_1}{F_1} \right)^2 \quad (10.4.6-2)$$

式中: d_z ——试样顶端的轴向振动线位移幅(m);
 f_1 ——试样系统轴向振动的共振频率(Hz);
 F_1 ——轴向无量纲频率因数。

10.4.7 轴向无量纲频率因数应按下列公式计算:

$$F_1 \tan F_1 = \frac{1}{T_1} \quad (10.4.7-1)$$

$$T_1 = \frac{m_a}{m_s} \left[1 - \left(\frac{f_{a1}}{f_1} \right)^2 \right] \quad (10.4.7-2)$$

式中: T_1 ——仪器激振端轴向惯量因数;
 m_a ——试样顶端激振压板系统的质量(kg);
 f_{a1} ——无试样时激振压板系统轴向共振频率(Hz)。

10.4.8 试样轴向振动阻尼比应按下列公式计算:

$$\zeta_{dz} = \frac{\delta_1(1+S_1) - \delta_{a1}S_1}{2\pi} \quad (10.4.8-1)$$

$$S_1 = \frac{m_a}{m_s} \left(\frac{f_{a1}F_1}{f_1} \right)^2 \quad (10.4.8-2)$$

式中: δ_1 ——试样系统轴向自由振动的对数衰减率;
 δ_{a1} ——仪器激振端压板系统轴向自由振动对数衰减率,应在仪器标定时确定;
 S_1 ——试样系统轴向能量比。

10.4.9 动剪切模量与动弹性模量、动剪应变幅与动轴向应变幅之间的换算,可按本规范第 9.4.3 条的有关规定进行。

10.4.10 在共振柱仪上测试的最大动剪切模量或最大动弹性模量,应绘制与二维或三维平均固结应力的双对数关系曲线图(如图 10.4.10-1、图 10.4.10-2 所示),其相互关系可用下列公式表达:

$$G_{dmax} = C_1 P_a^{(1-m_1)} \sigma_c^{m_1} \quad (10.4.10-1)$$

$$E_{dmax} = C_2 P_a^{(1-m_2)} \sigma_c^{m_2} \quad (10.4.10-2)$$

$$\text{二维时,可用下式表达: } \sigma_c = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c})/2 \quad (10.4.10-3)$$

$$\text{三维时,可用下式表达: } \sigma_c = (\sigma_{1c} + \sigma_{3c})/3 \quad (10.4.10-4)$$

式中: G_{dmax} ——最大动剪切模量(kPa);

E_{dmax} ——最大动弹性模量(kPa);

C_1, m_1 ——最大动剪切模量与平均有效应力关系双对数拟合直线参数(如图 10.4.10-1 所示);

C_2, m_2 ——最大动弹性模量与平均固结应力关系双对数拟合直线参数(如图 10.4.10-2 所示);

P_a ——大气压力(kPa)。

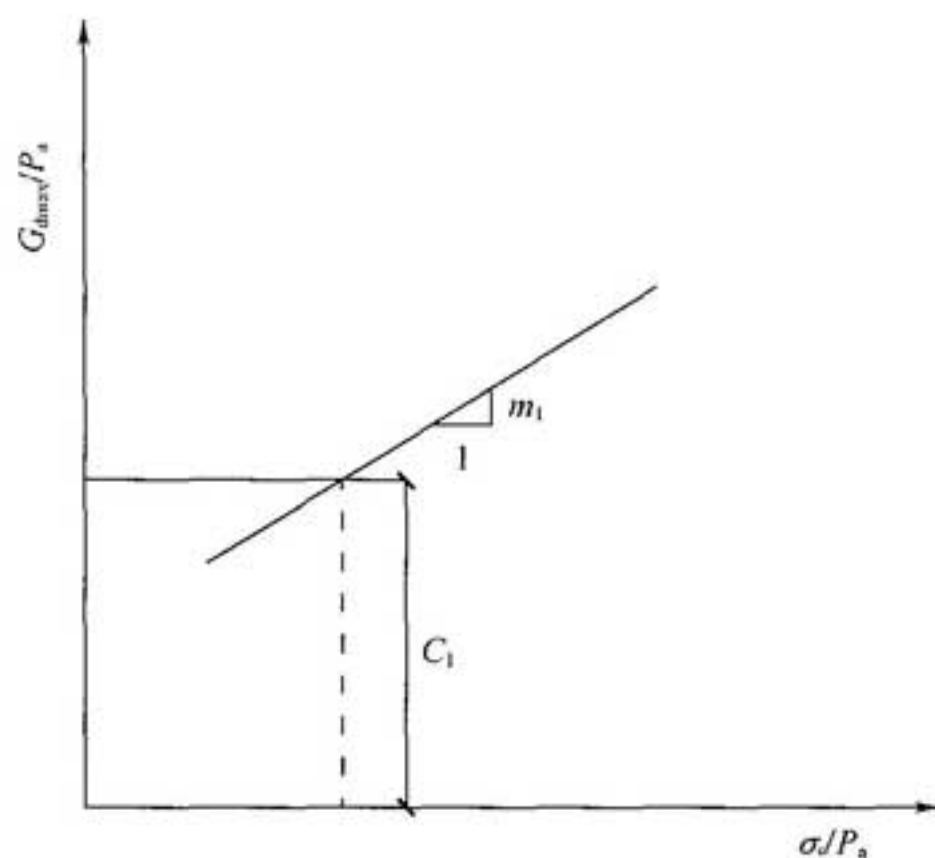


图 10.4.10-1 最大动剪切模量与平均固结应力的关系

G_{dmax} ——最大动剪切模量; P_a ——大气压力; σ_c ——试样平均固结应力;

C_1, m_1 ——最大动剪切模量与平均有效应力关系双对数拟合直线参数

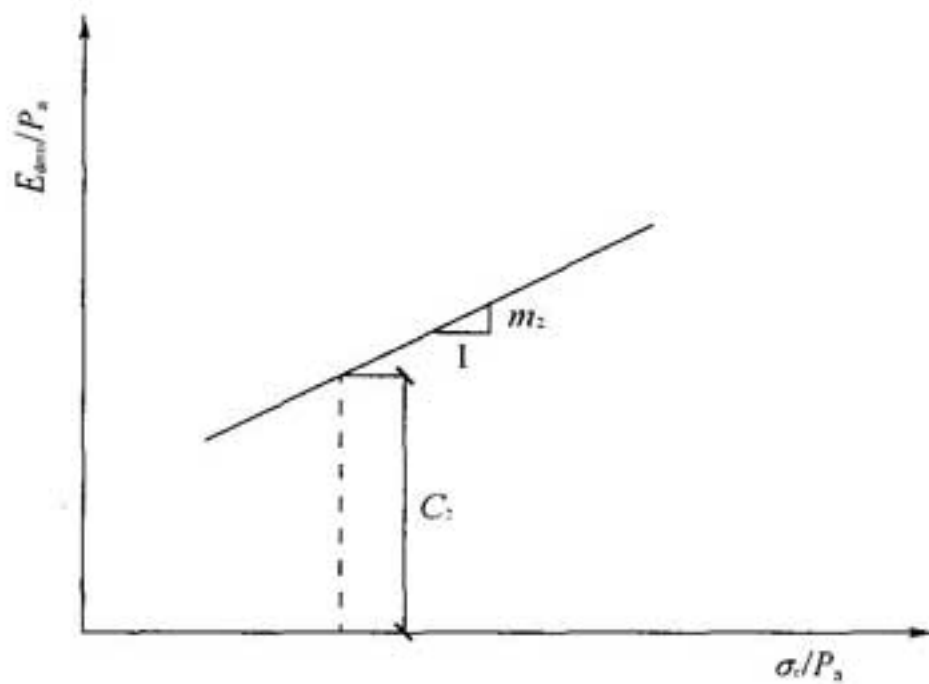


图 10.4.10-2 最大动弹性模量与平均固结应力的关系

E_{dmax} —最大动弹性模量； P_s —大气压力； σ_c —试样平均固结应力；

C_2, m_2 —最大动弹性模量与平均固结应力关系双对数拟合直线参数

10.4.11 对应于每一个固结应力条件，根据测试分析结果确定的动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅对数值之间的关系曲线，或动弹性模量比、阻尼比与轴应变幅对数值之间的关系曲线，应按本规范第 9.4.4 条规定绘制。

11 空心圆柱动扭剪测试

11.1 一般规定

11.1.1 当土体所受动力作用符合下列情况之一时,宜采用空心圆柱动扭剪测试:

- 1 地震作用,需同时考虑竖向地震作用和水平地震作用时;
- 2 波浪作用,土体所受广义剪应力大小恒定,主应力轴循环旋转时;
- 3 交通作用,土体所受广义剪应力和主应力轴同时变化时;
- 4 其他存在主应力轴变化的动力作用时。

11.2 设备和仪器

11.2.1 空心圆柱仪应具有良好的频响特性,且性能稳定、灵敏度高和失真小。

11.2.2 空心圆柱动扭剪测试的主机静力加载系统和孔隙水压力测量系统,应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123的有关规定。

11.2.3 空心圆柱动扭剪测试的主机动力加载系统,应具有施加给定数字信号波形的动荷载或动应变的功能。

11.2.4 土试样几何尺寸应符合下列公式的要求:

$$h_s \geq 5.44 \sqrt{r_o - r_i} \quad (11.2.4-1)$$

$$r_i/r_o \leq 0.65 \quad (11.2.4-2)$$

式中: r_o ——试样外半径(mm);

r_i ——试样内半径(mm)。

11.2.5 测试设备的实测应变幅范围应满足工程动力分析的需要。

11.2.6 用于测试加载应力、土样变形和孔隙水压力等参数的动态传感器,应满足量程、频响特性和精度等方面的技术要求。记录仪应采用数字采集系统。

11.3 测试方法

11.3.1 试样的制备、安装和饱和方法应符合本规范第 9.3.1 条的规定。

11.3.2 试样制备,其含水量和干密度等指标宜与工程现场条件相类似。

11.3.3 饱和试样在周围压力作用下的孔隙水压力系数应符合本规范第 9.3.3 条的规定。

11.3.4 测试时应使试样在周围压力作用下进行固结,试样的固结应力条件应根据地基土的现场应力条件确定。试样每小时的排水量不大于 60mm^3 时,可继续施加动应力或动应变。

11.3.5 对不同类型的动荷载作用进行测试时,施加动应力或动应变的波形和频率,应与工程对象所承受的动力荷载相近。

11.3.6 对经受地震、波浪和交通等动力作用的工程土体进行测试时,应采用相应的竖向偏应力和扭矩加载波形。

11.4 数据处理

11.4.1 试样轴力、内围压、外围压、扭矩、轴向位移、外径位移、内径位移、扭转角位移和孔隙水压力等物理量,应按仪器的标定系数及试样尺寸,由测试记录值进行换算确定。

11.4.2 试样轴向应力、环向应力、径向应力和剪应力应按下列公式计算:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_{co}^2 - r_{ci}^2)} + \frac{p_o r_{co}^2 - p_i r_{ci}^2}{(r_{co}^2 - r_{ci}^2)} \quad (11.4.2-1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_{co} - p_i r_{ci}}{r_{co} - r_{ci}} \quad (11.4.2-2)$$

$$\sigma_r = \frac{p_o r_{co} + p_i r_{ci}}{r_{co} + r_{ci}} \quad (11.4.2-3)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{T}{2} \left[\frac{3}{2\pi(r_{co}^3 - r_{ci}^3)} + \frac{4(r_{co}^3 - r_{ci}^3)}{3\pi(r_{co}^2 - r_{ci}^2)(r_{co}^4 - r_{ci}^4)} \right] \quad (11.4.2-4)$$

式中： σ_z ——试样轴向应力(kPa)；
 σ_θ ——试样环向应力(kPa)；
 σ_r ——试样径向应力(kPa)；
 $\tau_{z\theta}$ ——试样剪应力(kPa)；
 W ——试样轴力(N)；
 p_o ——试样外围压(kPa)；
 p_i ——试样内围压(kPa)；
 T ——试样扭矩(N·m)；
 r_{co} ——固结完成后试样外径(mm)；
 r_{ci} ——固结完成后试样内径(mm)。

11.4.3 试样有效大主应力、试样中主应力和试样小主应力应按下列公式计算：

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} - \Delta u \quad (11.4.3-1)$$

$$\sigma'_2 = \sigma_r - \Delta u \quad (11.4.3-2)$$

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} - \Delta u \quad (11.4.3-3)$$

式中： σ'_1 ——试样有效大主应力(kPa)；
 σ'_2 ——试样有效中主应力(kPa)；
 σ'_3 ——试样有效小主应力(kPa)；
 Δu ——试样孔隙水压力(kPa)。

11.4.4 试样轴向应变、试样环向应变、试样径向应变和试样剪应变应按下列公式计算：

$$\epsilon_z = \frac{d_z}{h_{cs}} \quad (11.4.4-1)$$

$$\epsilon_{\theta} = -\frac{d_o + d_i}{r_{co} + r_{ci}} \quad (11.4.4-2)$$

$$\epsilon_r = -\frac{d_o - d_i}{r_{co} - r_{ci}} \quad (11.4.4-3)$$

$$\gamma_{z\theta} = \frac{\theta(r_{co}^3 - r_{ci}^3)}{3h_{cs}(r_{co}^2 - r_{ci}^2)} \quad (11.4.4-4)$$

式中： ϵ_z ——试样轴向应变；

ϵ_{θ} ——试样环向应变；

ϵ_r ——试样径向应变；

$\gamma_{z\theta}$ ——试样剪应变；

d_z ——试样轴向位移(mm)；

d_o ——试样外径位移(mm)；

d_i ——试样内径位移(mm)；

θ ——试样扭转角位移(rad)；

h_{cs} ——固结完成后试样高度(mm)。

11.4.5 试样大主应变、试样中主应变和试样小主应变应按下列公式计算：

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_{\theta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_{\theta}}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (11.4.5-1)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_r \quad (11.4.5-2)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_{\theta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_{\theta}}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (11.4.5-3)$$

式中： ϵ_1 ——试样大主应变；

ϵ_2 ——试样中主应变；

ϵ_3 ——试样小主应变。

11.4.6 试样的动弹性模量和试样的动剪切模量，应分别根据记录的轴向动应力-动应变滞回曲线和剪切动应力-动应变滞回曲线(图 9.4.2 所示)，按下列公式计算：

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \quad (11.4.6-1)$$

$$G_d = \frac{\tau_{z0}}{\gamma_{z0}} \quad (11.4.6-2)$$

11.4.7 在测试记录的动应力、动应变和动孔隙水压力的时程曲线上,应按本规范第 9.3.11 条规定的破坏标准确定破坏振次。相应于该破坏振次的动强度比,应按下列公式计算:

$$R_f = \frac{q}{2\sigma'_{0c}} \quad (11.4.7-1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2]} \quad (11.4.7-2)$$

$$\sigma'_{0c} = (\sigma'_{1c} + \sigma'_{2c} + \sigma'_{3c})/3 \quad (11.4.7-3)$$

式中: q ——试样广义剪应力幅值(kPa);

σ'_{0c} ——初始平均固结应力(kPa);

σ'_{1c} ——试样固结完后的大主应力值(kPa);

σ'_{2c} ——试样固结完后的中主应力值(kPa);

σ'_{3c} ——试样固结完后的小主应力值(kPa)。

11.4.8 同一固结应力条件下多个试样的测试结果,宜绘制动强度比与破坏振次的半对数关系曲线,并可按工程要求的等效破坏振次,由该曲线确定相应的动强度比。

附录 A 地基动力特性测试方法

表 A 地基动力特性测试方法

测试方法	适用范围	工程要求
模型基础 动力参数测试	采用强迫振动或自由振动测试方法	为置于天然地基、人工地基或桩基上的动力机器基础的设计提供动力参数
振动衰减测试	振动波沿地面衰减	为机器基础、建筑物及构筑物基础的振动和隔振设计提供地基动力参数
地脉动测试	周期在 0.1s~1.0s、振动线位移小于 3 μ m	为工程抗震和隔振设计提供场地的卓越周期和脉动幅值
波速测试	采用单孔法、跨孔法、面波法以及弯曲元法测试地基的波速	确定地基的动弹性模量、动剪切模量和动泊松比;进行场地土的类型划分和场地土层的地震反应分析;在地基勘察中,配合其他测试方法综合评价场地土的工程性质
循环荷载板 测试	在承压板上反复加荷与卸荷测试	为机器基础设计提供地基弹性模量和地基抗压刚度系数
振动三轴测试	测试黏性土、粉土和砂土的动力特性	为工程场地、边坡、建筑物和构筑物进行动力反应分析和抗震设计提供动力特性参数
共振柱测试	测试黏性土、粉土和砂土试样在应变幅不超过 10 ⁻⁴ 条件下的动弹性模量、动剪切模量和阻尼比	为工程场地、边坡、建筑物和构筑物进行动力反应分析提供动力特性参数
空心圆柱 动扭剪测试	测试复杂应力路径下黏性土、粉土和砂土的动模量、动强度等特征	为经受地震、波浪和交通等动力作用的工程场地、边坡、建筑物和构筑物进行动力反应分析提供动力特性参数

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《动力机器基础设计规范》GB 50040

《土工试验方法标准》GB/T 50123

中华人民共和国国家标准
地基动力特性测试规范

GB/T 50269 - 2015

条文说明

修 订 说 明

《地基动力特性测试规范》GB/T 50269—2015,经住房城乡建设部 2015 年 8 月 27 日以第 896 号公告批准发布。

本规范是在《地基动力特性测试规范》GB/T 50269—97 的基础上修订而成,上一版的主编单位是机械工业部设计研究院,参编单位是中国水利水电科学研究院、北京市勘察设计研究院、同济大学、机械工业部勘察研究院、中国航空工业勘察设计院,主要起草人是李席珍、俞培基、吴学方、郝增志、吴成元、单志康、黄进、张守华、霍志人、李政。本规范修订过程中,编制组进行了广泛深入的调查研究,总结了我国工程建设地基动力特性测试的实践经验,同时参考了国外先进标准,与国内相关标准协调,通过调研、征求意见及工程试算,对增加和修订内容讨论、分析、论证,取得了重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、教学等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定,《地基动力特性测试规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	(79)
3	基本规定	(81)
4	模型基础动力参数测试	(82)
4.1	一般规定	(82)
4.2	设备和仪器	(83)
4.3	模型基础	(84)
4.4	测试方法	(86)
4.5	数据处理	(87)
4.6	地基动力参数的换算	(89)
5	振动衰减测试	(91)
5.1	一般规定	(91)
5.2	测试方法	(92)
5.3	数据处理	(93)
6	地脉动测试	(95)
6.1	一般规定	(95)
6.2	设备和仪器	(95)
6.3	测试方法	(96)
6.4	数据处理	(97)
7	波速测试	(98)
7.1	单孔法	(99)
7.2	跨孔法	(103)
7.3	面波法	(108)
7.4	弯曲元法	(110)
8	循环荷载板测试	(112)

8.1	一般规定	(112)
8.2	设备和仪器	(112)
8.3	测试前的准备工作	(113)
8.4	测试方法	(113)
8.5	数据处理	(114)
9	振动三轴测试	(115)
9.1	一般规定	(115)
9.2	设备和仪器	(115)
9.3	测试方法	(116)
9.4	数据处理	(118)
10	共振柱测试	(119)
10.1	一般规定	(119)
10.2	设备和仪器	(119)
10.3	测试方法	(119)
10.4	数据处理	(120)
11	空心圆柱动扭剪测试	(122)
11.1	一般规定	(122)
11.2	设备和仪器	(123)
11.3	测试方法	(124)
11.4	数据处理	(125)

1 总 则

1.0.1 为了使现场和室内的测试、分析、计算方法统一化,为工程建设提供符合实际的地基动力特性参数,做到技术先进、确保质量,很需要有一本各种动力测试方法齐全的规范。《地基动力特性测试规范》GB/T 50269—97(以下简称“原规范”)自 1998 年实施以来,已有 17 年时间,在这期间,土的动力特性测试技术有一定的发展,因此,有必要对原规范进行修订。

1.0.2 地基动力特性参数,是机器基础振动和隔振设计以及在动载荷作用下各类建筑物、构筑物的动力反应及地基动力稳定性分析必需的资料。本规范适用于原位和室内确定天然地基(包括膨胀土、湿陷性黄土、残积土等各种特殊土)和人工地基(包括碎石桩、夯实土等人工加固的地基)动力特性的测试、分析。

1.0.3 不同的工程需用的测试方法和动力参数也不相同,如用模型基础振动测试和振动衰减测试的资料可计算地基刚度系数、阻尼比、参振质量和地基土能量吸收系数,主要应用于动力机器基础的振动设计、精密仪器仪表的隔振设计以及评估振动对周围环境的影响等;地脉动测试可确定场地土的卓越周期和线位移,可应用于工程抗震和隔振设计;波速测试主要用于场地土的类型划分、场地土层的地震反应分析,以及用波速计算泊松比、动弹性模量、动剪切模量,也可计算地基刚度系数;循环荷载板测试可计算地基的弹性模量、地基的刚度系数,一般可用于大型机床、水压机、高速公路、铁路等工程设计;振动三轴和共振柱测试可确定地基土的动模量、阻尼比、动强度等参数,可用于对建筑物和构筑物进行动力反应分析以及对地基土和边坡土进行动力稳定性分析。上述说明,相同类型的动力参数,可采用不同的测试、分析方法,因此应根据

不同工程设计的实际需要,选择有关的测试、计算方法。如动力机器基础设计所需的动力参数,应优先选用模型基础振动测试,因模型基础振动测试与动力机器基础的振动是同一种振动类型,将试验基础实测计算的地基动力特性参数,经基底面积、基底静压力、基础埋深等的修正后,最符合设计基础的实际情况。另外,从国外有些国家的资料看,也有用弹性半空间理论来计算机器基础的振动,其地基刚度系数则采用地基土的波速进行计算,这说明不同的计算理论体系需采用不同的测试方法和计算方法。对一些特殊重要的工程,尚应采用几种方法分别测试,以便综合分析、评价场地土层的动力特性。

3 基本规定

3.0.1 为了做好测试工作,在测试前应制定测试方案,将测试目的和要求、内容、方法、仪器布置、加载方法、数据分析方法等列出,以便顺利进行测试,保证测试结果满足工程建设的需要。当采用模型基础进行动力参数测试时,尚应根据工程设计的要求,确定模型基础的数量、尺寸,在测试方案中附上模型基础的设计图。

3.0.2 根据地基动力特性现场测试的需要,提出测试时所应具备的资料,其目的是在现场选择测点时,避开这些干扰源和地下管道、电缆等的影响。

3.0.3 根据我国计量法的要求,测试所用的计量器具必须送至法定计量检定单位进行定期检定,且使用时必须在计量检定的有效期内,以保证测试数据的准确可靠性和可追溯性。虽然计量器具在有效计量检定周期之内,但由于现场测试工作的环境较差,使用期间仍可能由于使用不当或环境恶劣造成计量器具的受损或计量参数发生变化。因此要求测试前对仪器设备进行检测调试,发现问题后应重新检定。

3.0.4 测试场地应尽可能选择在离建筑场地及邻近地区干扰振源较远的位置。实在无法避开干扰振源时,与有关方商量,选择外界干扰源停机的间隙进行测试。由于测点布设在水泥、沥青路面、地下管线和电缆上时,影响测试数据的准确性和代表性,因此应避开这些地方。

3.0.5 为了便于设计使用和资料积累,本条规定了测试报告应包括的几部分内容,其中测试结果、测试分析和测试结论等内容随各章测试方法不同而各不相同,其规定的内容均放在各章的一般规定中。

4 模型基础动力参数测试

4.1 一般规定

采用现场模型基础强迫振动和自由振动方法测试,是为置于天然地基、人工地基或桩基上的动力机器基础的设计提供动力参数。原规范将本章命名为“激振法测试”,由于各种动力测试方法一般都包括“激振”和“测振”两个部分。用“激振法”来命名本章的内容不太明确和具体。因此本次修订改为“模型基础动力参数测试”。由于天然地基和人工地基的测试方法使用的设备和仪器、现场准备工作、数据处理等都完全相同,仅是块体基础和桩基础的尺寸不同,而块体基础适用于除桩基础以外的天然地基和人工地基上的测试。因此本章各条中提到的模型基础包括块体基础和桩基础,地基动力参数即包括天然地基和人工地基的动力参数。如果仅提块体基础的动力参数,即表示除桩基外的人工地基和天然地基的动力参数。在数据处理时,块体基础和桩基础的幅频响应曲线处理方法相同,块体基础和桩基础的各向阻尼比计算方法相同。条文中各向阻尼比的计算,均包含块体基础和桩基础,基础在各个方向振动参振总质量的计算方法均包括块体基础和桩基础。由测试资料计算地基抗压刚度时,块体基础和桩基础的计算方法亦相同。只是计算抗压刚度系数时,两者才有区别。块体基础的抗压刚度系数由抗压刚度除以基础底面积得到,而对于桩基则除以桩数。

本规范所指动力机器基础,与现行国家标准《动力机器基础设计规范》GB 50040 第1章总则中的规定内容一致。

4.1.1 地基动力参数是计算动力机器基础振动的关键数据,数据的选用是否符合实际,直接影响到基础设计的效果,而测试方法不

同,则由测试资料计算的地基动力参数也不完全一致,因此测试方法的选择,应与设计基础的振动类型相符合,如设计周期性振动的机器基础,应在现场采用强迫振动测试方法。

4.1.2 模型基础除尺寸外,其他条件应尽可能模拟实际基础的情况。因此了解这些设计内容,对于测试点的布设是非常重要的。测试点应尽可能布置在实际基础的标高和位置附近。

4.1.3 本条规定了测试结果的具体内容,近几年随着计算机的发展,由测试结果计算出各种参数已经程序化,因此本次修订规范不再罗列计算表。

4.1.4 明置基础的测试目的是为了获得基础下地基的动力参数,埋置基础的测试目的是为了获得埋置后对动力参数的提高效果。因为所有的机器基础都有一定的埋深,有了这两者的动力参数,就可进行机器基础的设计。因此测试基础应分别做明置和埋置两种情况的振动测试。基础四周回填土是否夯实,直接影响埋置作用对动力参数的提高效果,在做埋置基础的振动测试时,四周的回填土一定要分层夯实,本次修订,规定回填土的压实系数不小于0.94。压实系数为各层回填土平均干密度与室内击实试验求得填土在最优含水量状态下的最大干密度的比值。

4.1.5 桩基抗压刚度除以桩数,即为单桩抗压刚度。参振总质量是承台(基础)、激振器及部分桩土参振质量的总和。

4.1.6 在动力机器基础设计中,需要提供的动力参数就是各个振型的地基刚度系数和阻尼比。通过现场模型基础(小基础)振动试验,可得到各种振型的动力反应曲线(幅频曲线),然后根据质弹阻理论计算出地基刚度系数和阻尼比。

4.2 设备和仪器

4.2.1 机械式激振设备的扰力可分为几档,测试时其扰力一般皆能满足要求。由于块体基础水平回转耦合振动的固有频率及在软弱地基土的竖向振动固有频率一般均较低,因此要求激振设备

的最低频率尽可能低,最好能在 3Hz 就可测得振动波形,至高不能超过 5Hz,这样测出的完整的幅频响应共振曲线才能较好地满足数据处理的需要,而桩基础的竖向振动固有频率高,要求激振设备的最高工作频率尽可能的高,最好能达到 60Hz 以上,以便能测出桩基础的共振峰。电磁式激振设备的工作频率范围很宽,只是扰力太小时对桩基础的竖向振动激不起来,因此规定扰力不宜小于 2000N。

4.2.2 重锤质量太小时,难以激发块体基础的自由振动,因此本条规定重锤质量不宜小于基础质量的 1/100。规定落高的目的是为了为了保证落锤具有足够的能量激起能满足测试需要的基础振动。

4.3 模型基础

4.3.1 本条规定了模型基础的尺寸(长×宽×高)和数量。块体数量最少 2 个,超过 2 个时可改变超过部分的基础面积而保持高度不变,获得底面积变化对动力参数的影响,或改变超过部分基础高度而保持底面积不变,获得基底应力变化对动力参数的影响。基础尺寸应保证扰力中心与基础重心在一垂线上,高度应保证地脚螺栓的锚固深度,又便于测试基础埋深对地基动力参数的影响。基础的高度太大,挖土或回填都增加许多劳动量,而高度太小,基础质量小,基础固有频率高,如激振器的扰频不高,就会给测共振峰带来困难,因此基础的高度既不能太大,也不能太小。

机器基础的底面一般为矩形,为了使模型基础与设计基础的底面形状相类似,本条规定了采用矩形基础,且其长、宽、高均具有一定的比例。

4.3.2 桩基的刚度,不仅与桩的长度、截面大小和地基土的种类有关,还与桩的间距、桩的数量等有关。一般机器基础下的桩数,根据基底面积的大小,从几根到几十根,最多也有到一百多根的,而模型基础的桩数不能太多,根据以往试验的经验,一根桩(带桩承台)的测试效果不理想,2 根、4 根桩(带桩承台)的测试效果比较

好,但4根桩的测试费用较大,因此本条文规定的是2根桩。如现场有条件做桩数对比测试时,也可增加4根桩和6根桩的测试。由于桩基的固有频率比较高,桩承台的高度应该比天然地基的基础高度大,否则固有频率太高,共振峰很难测出来。对桩承台的尺寸作出规定的目的是为了为了使2根桩的测试资料计算的参数,在折算为单桩时可将桩承台划分为1根桩的单元体进行分析。

4.3.3 由于地基的动力特性参数与土的性质有关,如果模型基础下的地基土与工程基础下的地基土不一致,测试资料计算的参数不能用于设计基础,因此模型基础的位置应选择在拟建基础附近相同的土层上。模型基础的基底标高,最好与拟建基础基底标高一致,但考虑到有的动力机器基础高度大,基底埋置深,如将小的模型基础也置于同一标高,现场施工与测试工作均有困难。因此规范条文中对此未作规定,就是为了给现场测试工作有灵活余地,可视基底标高的深浅以及基底土的性质确定。关键是要掌握好模型基础与拟建基础底面的土层结构相同。

4.3.4 基坑坑壁至模型基础侧面的距离应大于500mm,其目的是为了在做基础的明置试验时,基础侧面四周的土压力不会影响到基础底面土的动力参数测试。在现场做测试准备工作时,不要把试坑挖得太大,即距离略大于500mm即可。因为距离太大了,做埋置测试时,回填土的工作量大,应根据现场具体情况掌握好分寸。坑底应保持原状土,即挖坑时,不要将模型基础底面的原状土破坏,因为基底土是否遭到破坏,直接影响测试结果。坑底面应为水平面,因为只有水平面,基础浇灌后才能保持基础重心、底面形心和竖向激振力位于同一垂线上。

4.3.5 在现场做准备工作时,一定要注意基础上预埋螺栓或预留螺栓孔的位置。预埋螺栓的位置要严格按试验图纸上的要求,不能偏离,只要有一个螺栓偏离,激振器的底板就安装不进去。预埋螺栓的优点是与现浇基础一次做完,缺点是位置可能放不准,影响激振器的安装,因此在施工时,可采用定位模具以保证位置准确。

预留螺栓孔的优点是,待激振器安装时,可对准底板螺孔放置螺栓,放好后再灌浆,缺点是与现浇基础不能一次做完。这两种方法选择哪一种,可根据现场条件确定。如为预留孔,则孔的面积不应小于 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$,孔太小了,灌浆不方便。螺栓的长度不小于 400mm ,主要是为了保证在受动拉力时有足够的锚固力,不被拉出,具体加工时螺栓下端可制成弯钩或焊一块铁板,以增强锚固力。露出激振器底板上面的螺栓,其螺丝扣的高度,应足够能拧上两个螺母和一个弹簧垫圈。加弹簧垫圈和用两个螺母,目的是为了在整个激振测试过程中,螺栓不易被震松。在试验工作结束以前,螺栓的螺丝扣一定要保护好,以免碰坏。

4.4 测试方法

4.4.1 在激振中心两侧对称位置各布置一个竖向传感器,便于对比分析。

4.4.2 在基础顶面两端布置竖向传感器是为了测基础回转时的线位移,以便计算基础的回转角,其间的距离必须量准。

4.4.3 基础的扭转振动测试,过去国内外都很少做过,设计时所应用的动力参数均与竖向测试的地基动力参数挂钩,而竖向与扭转向的关系也是通过理论计算所得。为了能测试扭转振动,原机械工业部设计研究院和中航勘察设计研究院进行过多次的测试研究工作,原机械工业部设计研究院于 90 年代成功地做了扭转振动测试,中航勘察设计研究院还专门设计了扭转激振器,共测试了十几个基础的扭转振动,测出了在扭转扰力矩作用下水平线位移随频率变化的幅频响应共振曲线。条文中传感器的布置方法,最容易判别其振动是否为扭转振动,如为扭转振动,则实测波形的相位相反(即相差 180°)。

4.4.4 强迫振动测试时,在共振区以内(即 $0.75f_m \leq f \leq 1.25f_m$, f_m 为共振频率),频率应尽可能测密一些,最好是 0.5Hz 左右。由于共振峰点很难测得,激振频率在峰点很易滑过去,不一定能稳

住在峰点,因此只有尽量密集一些,才易找到峰点,减少人为的误差。共振时的线位移幅值太小时测量误差大,因为会落在地微动的幅值区内;而如果线位移大了,一是峰点更难测得,二是线位移太大,有可能使地基土呈现非线性,影响地基土的动力参数的测试。周期性振动的机器基础,当 $f \geq 10\text{Hz}$ 时,其线位移都不会大于 $150\mu\text{m}$ 。

4.4.6 竖向自由振动测试,当重锤下落冲击基础后,基础产生有阻尼自由振动,第一个波的线位移最大,然后逐渐减小,基础最大线位移应取第一个波。为减小测试时高频波的影响及避免基础顶面被冲坏,测试时可在基础顶面中心处放一块稍厚的橡胶垫。竖向自由振动,有时会出现波形不好的情况,测试时应注意检查波形是否正常。

4.4.7 基础水平自由振动测试,可采用木锤敲击,敲击点在基础侧面轴线顶端,比较易于产生回转振动。敲击时,可以沿长轴线(与强迫振动时水平激振力的方向一致),也可沿短轴线敲击,可对比两者的参数差异情况,提供设计用的参数,应与设计基础水平扰力的方向一致。

4.5 数据处理

I 强迫振动

4.5.3 由 d_z-f 幅频响应曲线计算的地基竖向动力参数,其计算值与选取的点有关,在曲线上选不同的点,计算所得的参数不同。为了统一,除选取共振峰点外,尚应在曲线上选取三点,计算平均阻尼比及相应的抗压刚度和参振总质量,这样计算的结果,差别不会太大,这种计算方法,必须要把共振峰点测准; $0.85f_m$ 以上的点不取,是因为这种计算方法对试验数据的精度要求较高,略有误差,就会使计算结果产生较大差异;另外,低频段的频率也不宜取得太低,频率太低时,振动线位移很小,受干扰波的影响,测量的误差较大,使计算的误差加大。在实测的共振曲线上,有时会出现小

“鼓包”，不能取用“鼓包”上的数据，否则会使计算结果产生较大的误差，因此要根据不同的实测曲线，合理地采集数据。根据过去大量测试资料数据处理的经验，应按下列原则采集数据：

(1)对出现“鼓包”的共振曲线，“鼓包”上的数据不取；

(2) $0.85f_m \leq f \leq f_m$ 区段内的数据不取；

(3)低频段的频率选择，不宜取得太低，应取波形好的，测量误差小的频率段进行，一般在 $0.5f_m \sim 0.85f_m$ 间取值，较为适宜。

4.5.6 由于在一些情况下不能测到共振峰，这时只能采用低频求刚度的办法计算。但是由于 f_1 、 f_2 值的选取十分重要，为了减少人为的误差。规定选取的点，要在尽量靠近测试的最大频率的 0.7 倍附近选取。这样能够近似地对应于测出共振峰情况下的 $0.5f_m \sim 0.85f_m$ 的情况。

4.5.7~4.5.11 由于水平回转耦合振动和扭转振动的共振频率一般都在 10Hz~20Hz 之间，低频段波形较好的频率大约 8Hz，而 $0.85f_{m1}$ 以上的点不能取，则共振曲线上剩下可选用的点就不多了。因此水平回转耦合振动和扭转振动资料的分析方法与竖向振动不一样，不需要取三个以上的点，而只取共振峰峰点频率及相应的水平振动线位移，和另一频率为 $0.707f_{m1}$ 点的频率和水平振动线位移代入公式 (4.5.7-1)、(4.5.7-2)、(4.5.11-1)、(4.5.11-2) 计算阻尼比，而且选择这一点计算的阻尼比与选择几点计算的平均阻尼比很接近。

II 自由振动

4.5.14 一般有条件做强迫振动试验的工程，都应在现场做强迫振动试验，没有条件时，才仅做自由振动试验。原因是竖向自由振动试验阻尼较大时，特别是有埋置的情况，实测得的自由振动波数少，很快就衰减了，从波形上测得的固有频率值以及由线位移计算的阻尼比都不如强迫振动试验测得的准确。当然，基础固有频率比较高时，强迫振动试验测不出共振峰的情况也会有的。因此有条件时，两种试验都做，可以相互补充。计算固有频率时，应从记

录波形的 $1/4$ 波长后面部分取值,因第一个 $1/4$ 波长受冲击的影响,不能代表基础的固有频率。

4.5.18 由于基础水平回转耦合振动测试的阻尼比,较竖向振动的阻尼比小,实测的自由振动衰减波形比较好,从波形上量得的固有频率与强迫振动试验实测的固有频率基本一样。其缺点是不像竖向振动那样可以计算出总的参振质量 m_z (包括土的参振质量,而 K_z 也包括了土的参振质量),只能用模型基础的质量计算地基的刚度。由于水平回转耦合自由振动实测资料不能计算土的参振质量,因此在提供给设计人员使用的实测资料时,一定要写明哪些刚度系数中包含了土的参振质量影响。用这些刚度系数计算基础的固有频率时,也必须将土的参振质量加到基础的质量中。如果刚度系数中不包含土的参振质量,也必须写明设计时不考虑土的参振质量。

4.6 地基动力参数的换算

4.6.1 由于地基动力参数值与基础底面积大小、基础高度、基底应力、基础埋深等有关,而模型基础的面积大小、基础高度、基底应力、基础埋深与设计的实际动力机器基础在这些方面都不可能相同。因此由试验模型基础实测得到的地基动力参数应用于机器基础的振动和隔振设计时,必须进行相应的换算后,才能提供给设计应用。

4.6.3 基础四周的填土能提高地基刚度系数,并随基础埋深比的增大而增加,因此应将模型基础实测的地基刚度系数乘以基础埋深提高系数,进行修正后的地基刚度系数,才能用于设计有埋置的动力机器基础。桩基的抗剪、抗扭刚度系数值,换算方法可与模型块体基础的相同。

4.6.4 基础下地基的阻尼比随基底面积的增大而增加,并随基底静压力的增大而减小,因此由模型基础试验得出的阻尼比用于设计动力机器基础时,应将测试基础的质量比换算为设计基础的质

量比后才能用于机器基础的设计。

4.6.5 基础四周的填土能提高地基的阻尼比,并随基础埋深比的增大而增加,因此按设计基础的埋深比进行修正后的阻尼比,才能用于设计有埋置的动力机器基础。

4.6.6 基础振动时地基土参振质量值,与基础底面积的大小有关,因此由模型块体基础在明置时实测幅频响应曲线计算的地基参振质量,应换算为设计基础的底面积后才能应用于设计。

4.6.7 由于桩基的刚度,与试验时的桩数有关,根据 2 根桩桩基实测幅频响应曲线计算的 1 根桩的抗压刚度与 4 根桩桩基础测试资料计算的 1 根桩的抗压刚度相比,前者为后者的 1.3 倍,与 6 根桩桩基础测试资料计算的抗压刚度相比,为 1.36 倍。桩数再增加时,其变化逐渐减小,做测试桩基础的桩数规定为 2 根桩,根据工程需要,也可能做 2 根桩和 4 根桩的桩基础振动测试。因此本条规定由 2 根或 4 根桩的桩基础测试资料计算的抗压刚度值,应分别乘以群桩效应系数 0.75 或 0.90 后,才能提供给设计群桩基础应用。

5 振动衰减测试

5.1 一般规定

5.1.1 由于生产工艺的需要,在一个车间内同时设置有低转速和高转速的动力机器基础。一般低转速机器的扰力较大,基础振幅也较大,而高转速的动力机器基础振幅控制很严,因此设计中需要计算低转速机器基础的振动对高转速机器基础的影响,计算值是否符合实际,还与这个车间的地基能量吸收系数 α 有关,因此事先应在现场做基础强迫振动试验,实测振动波在地基中的衰减,以便根据振幅随距离的衰减,计算 α 值,提供设计应用。设计人员应按设计基础的距离选用 α 值,以计算低转速机器基础振动对高转速机器基础的影响。

振动能影响精密仪器、仪表的测量精度,也影响精密设备的加工精度。如果其周围有振源,应测定其影响大小,当其影响超过允许值时,必须对设计的精密仪器、仪表、设备等采取隔振或其他有效措施。

5.1.2 利用已投产的锻锤、落锤、冲压机、压缩机基础的振动,作为振源进行衰减测定,是最符合设计基础的实际情况的。因振源在地基土中的衰减与很多因素有关,不仅与地基土的种类和物理状态有关,而且与基础的面积、埋置深度、基底应力等有关,与振源是否周期性还是冲击性、是高频还是低频等多种因素有关,而设计基础与上述这些因素比较接近,用这些实测资料计算的 α 值,反过来再用于设计基础,与实际就比较符合。因此在有条件的地方,应尽可能利用现有投产的动力机器基础进行测定,只是在没有条件的情况下才现浇一个基础,采用机械式激振设备作为振源。如果设计的基础受非动力机器基础振动的影响,也可利用现场附近的

其他振源,如公路交通、铁路交通等的振动。

5.1.3 由于振动波的衰减与基础的明置和埋置有关,一般明置基础,按实测振动波衰减计算的 α 值大,即衰减快,而埋置基础,按实测振动波衰减计算的 α 值小,衰减慢。特别是水平回转耦合振动,明置基础底面的水平振幅比顶面水平振幅小很多,这是由于明置基础的回转振动较大所致。明置基础的振动波是通过基础底振动向周围传播,衰减快,如果均用测试基础顶面的振幅计算 α 值时,明置基础的 α 值则要大得多,用此 α 值计算设计基础的振动衰减时偏于不安全。因设计基础均有埋置,故应在测试基础有埋置时测定。

5.2 测试方法

5.2.1 由于传感器放在浮砂地、草地和松软的地层上时,影响测量数据的准确性,因此在选择放传感器的测点时,应避开这些地方。如无法避开,则应将草铲除、整平,将松散土层夯实。

5.2.2 由于振动沿地面的衰减与振源机器的扰力频率有关,一般高频衰减快,低频衰减慢,因此测试基础的激振频率应选择与设计基础机器的扰力频率一致。另外,为了积累扰力频率不相同测试的振动衰减资料,尚应做各种不同激振频率的振动衰减测试。

5.2.3 由于地基振动衰减的计算公式是建立在地基为弹性半空间无限体这一假定上的,而实际情况不完全如此。振源的方向不同,测试的结果也不相同。因此实测试验基础的振动在地基中的衰减时,传感器置于测试基础的方向,应与设计基础所需测试的方向相同。

5.2.4 由于近距离衰减快,远距离衰减慢,测点布置以近密远疏为原则,一般在离振源距离10m以内的范围,地面振幅随离振源距离增加而减小得快,因此传感器的布点应布密一些。如在5m以内,应每隔1m布置一台传感器;5m~15m范围内,每隔2m布置一台传感器;15m以外,每隔5m布置一台传感器。亦可根据设

计基础的实际需要,调整传感器的布置间距。

5.2.5 关于各种不同振源处的振动线位移测试,由于传感器测点位置的不同,会导致测试结果也不同,因此,本条对各种不同振源规定了传感器的测点位置。

5.3 数据处理

5.3.2 地基能量吸收系数的计算目前我国应用较普遍的有两种方法。除规范推荐的方法外,还有按高里茨公式计算:

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{r_0 - r} \ln \left(\frac{A_r}{A_0} \sqrt{\frac{r}{r_0}} \right) \quad (2)$$

对同一种土、同一个振源计算的 α 值随距离的变化,从图1中可以看出, α 不是一个定值。由于近振源处(约2倍~3倍基础边长),振动衰减很快,计算的 α 值很大,到一定距离后(见图1), α 值比较稳定,趋向一个变化不大的值,不管用哪个公式计算都是这个规律。因此,如果用一个平均的 α 值计算不同距离的振幅,则得出在近距离内的计算振幅比实际振幅大,而在远距离的计算振幅比实际的小,这样计算的结果都不符合实际。试验中应按照实测资料计算出 α 值随 r 的变化曲线,提供给设计应用,由设计人员根据设计基础离振源的距离选用 α 值。在计算 α 值前,应先将各种激振频率作用下测试的地面振动线位移随离振源距离远近而变化的关系绘制成各种曲线图。由曲线图即可发现测试的资料是否有规律,一般在近距离范围内,振动衰减快,远距离振动衰减慢。

本条文中表5.3.2引自现行国家标准《动力机器基础设计规范》GB 50040—96附录E。

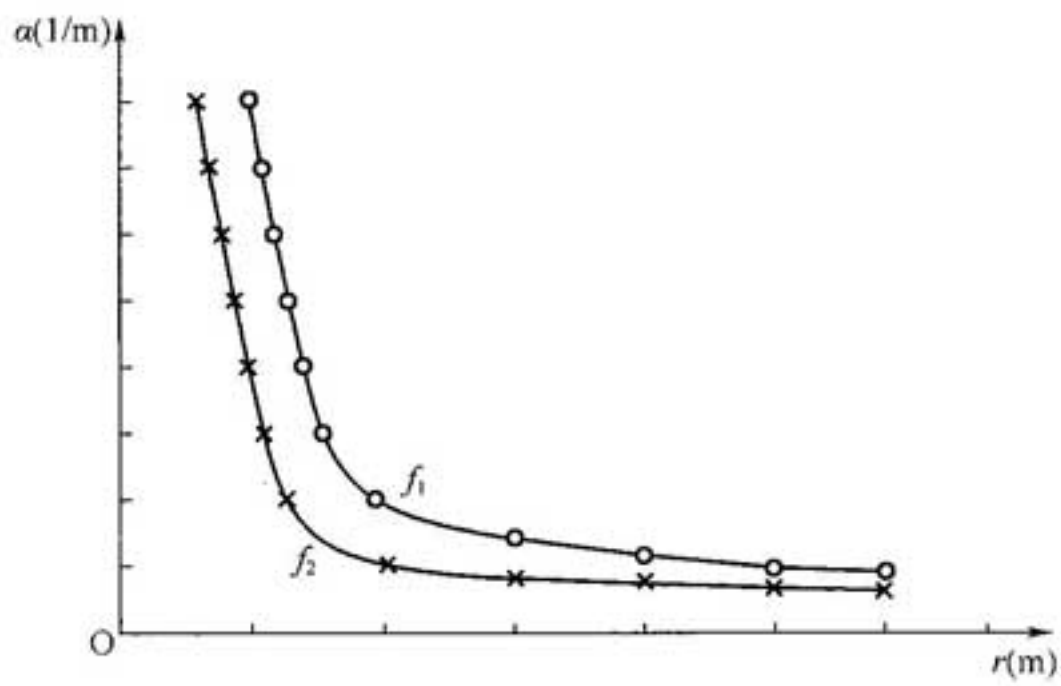


图 1 α 随 r 的变化曲线示意图

6 地脉动测试

6.1 一般规定

地脉动有长周期与短周期之分。周期大于 1.0s 的称为长周期,本规范涉及的地脉动周期在 0.1s~1.0s 范围内,属于短周期地脉动。

地脉动是由气象变化、潮汐、海浪等自然力和交通运输、动力机器等人为扰力引起的波动,经地层多重反射和折射,由四面八方传播到测试点的多维波群随机集合而成。随时间做不规则的随机振动,其振幅为小于几微米的微弱振动。它具有平稳随机过程的特性,即地脉动信号的频率特性不随时间的改变而有明显的不同,它主要反映场地地基土层结构的动力特性。因此它可以用随机过程样本函数集合的平均值来描述。

6.1.1 测试结果中的数据处理,为了避免频谱分析中的频率混淆现象,应对分析数据进行加窗函数处理,如哈明窗、汉宁窗、滑动指数窗等。

6.2 设备和仪器

6.2.1 地脉动的周期为 0.1s~1.0s,振幅一般在 $3\mu\text{m}$ 以下,因此要求地脉动测试系统灵敏度高、低频特性好、工作稳定可靠;信号分析系统应具有低通滤波、加窗函数以及常用的时域和频域分析软件。

6.2.4 地脉动测试目前已较广泛采用能满足地脉动测试分析要求的信号采集记录分析系统。它配备有时域、频域分析的各种软件,既能在现场进行实时分析,也可将信号记录在室内进行分析。

6.3 测试方法

6.3.1 每个建筑场地的地脉动测点,不宜少于2个。当同一建筑场地有不同的地质地貌单元,其地层结构不同,地脉动的频谱特征也有差异,此时可适当增加测点数量。

6.3.2 测点选择是否合适,直接影响地脉动测试的精确程度。如果测点选择不好,微弱的脉动信号有可能淹没于周围环境的干扰信号之中,给地脉动信号的数据处理带来困难。

6.3.3 建筑场地钻孔波速测试和地脉动测试,虽然目的和方法有别,但它们都与地层覆盖层的厚度及地层的性质有关,其地层的剪切波速与场地的卓越周期必然有内在的联系。地脉动观测点宜布置于波速孔附近。

测点三个传感器的布置是考虑到有些场地的地层具有方向性。如第四系冲洪积地层不同的方向有差异;基岩的构造断裂也具有方向性。因此要求按水平东西、水平南北、竖直三个方向布设传感器。

6.3.4 不同土工构筑物的基础埋深和形式不同,应根据实际需要、布置地下脉动观测点的深度;在城市地脉动观测时,交通运输等人为干扰24h不断,地面振动干扰大,但它随深度衰减很快,一般也需在一定深度的钻孔内进行测试。

通常远处震源的脉动信号是通过基岩传播反射到地层表面的,通过地面与地下脉动的测试,不仅可以了解脉动频谱的性状,还可了解场地脉动信号竖向分布情况和场地土层对脉动信号的放大和吸收作用。

6.3.5 本规范规定的脉动信号频率在1Hz~10Hz范围内,按照采样定理,采样频率大于20Hz即可,但实际工作中,最低采样频率常取分析上限频率的2.56倍。然而,采样频率太高,脉动信号的频率分辨率降低,影响卓越周期的分析精度。条文中提出采样频率宜为50Hz~100Hz,就考虑了脉动时域波形和谱图中的频率

分辨率。

6.4 数据处理

6.4.1 为了减少频谱分析中的频率混叠现象,事先应对分析数据进行窗函数处理,对脉动信号一般加滑动指数窗,哈明窗、汉宁窗较为合适。

脉动信号的性质可用随机过程样本函数集合的平均值来描述,即脉动信号的卓越频率应是多次频域平均的结果。从数理统计与测试分析系统的计算机内存考虑,经 32 次频域平均已基本能满足要求。

6.4.2 脉动信号频谱图一般为一个突出谱峰形状,卓越周期只有一个;如地层为多层结构时,谱图有多阶谱峰形状,通常不超过三阶,卓越周期可按峰值大小分别提出;对频谱图中无明显峰值的宽频带,可按电学中的半功率点确定其范围。

6.4.4 脉动幅值应取实测脉动信号的最大幅值。这里所指的幅值,可以是位移、速度、加速度幅值,可以根据测试仪器和工程的需要确定。

7 波速测试

用于测波速的方法较多,本章只涉及单孔法、跨孔法、表面波速法及弯曲元法。目前,因受振源条件及工作条件的限制,单孔法及跨孔法一般只用于测定深度 150m 以内土层的波速。在波速测试中,最常用的是剪切波速。

单孔法的特点是只用一个试验孔,在地面打击木板产生向下传播的压缩波(P波)和水平极化剪切波(SH波)。测出它到达位于不同深度的传感器的时间,就能定出它在垂直地层方向的传播速度。

跨孔法的特点是多个试验孔,振源产生水平方向传播的波,测出它到达位于各接收孔中与振源同标高的垂直向传感器的时间,可得到剪切波在地层中水平方向传播的速度。跨孔法测试深度较深,可测出地层中的软弱夹层,测试精度相对较高。

面波法是近年来国内外发展很快、应用逐渐广泛的一种浅层地震勘探方法。面波分为瑞利波(R波)和拉夫波(L波),而R波在振动波组中能量最强、线位移最大、频率最低,容易识别也易于测量,所以本规范面波法指瑞利波测试方法。

面波法的特点是在地面求瑞利波的速度,再利用瑞利波速与剪切波速的关系求出剪切波速。根据激振振源的不同,面波法分为稳态法、瞬态法。它们的测试原理相同,只是产生面波的震源不同。目前瞬态面波法应用较为广泛。

弯曲元法适用于测试细粒土和砂土从初始状态至塑性变形发展过程中的动力特性,本方法可与振动三轴测试等多种方法相结合。与共振柱等方法相比,弯曲元试验所能够达到的应变量级更小,因此得到的动剪切模量和动弹性模量也更接近于真实值。弯

曲元可以与很多室内及室外设备联合使用,因此可以用来研究各种因素对波速的影响,对动三轴等室内土单元试验,则可以用来研究动力加载历史对波速的影响。

随着基础理论研究、设备水平的不断提高以及工程实践经验的丰富,波速在工程中的应用范围不断得到增加,一般包括:①计算岩土动力参数,动弹性模量、动剪切模量、动泊松比;②计算地基刚度和阻尼比;③划分场地抗震类别;④估算场地卓越周期;⑤判定砂土地基的液化;⑥检验地基加固处理的效果;⑦弯曲元测试可以研究动力加载历史对最大动剪切模量和最大动弹性模量的影响。

7.1 单孔法

I 设备和仪器

7.1.1 对于剪切波振源,首先希望它在测线方向产生足够能量的剪切波;其次希望能通过相反方向的激发产生极性相反的二组剪切波,以便于确定剪切波的初至时间。

剪切波震源主要有击板法、弹簧激振法、定向爆破法三种。弹簧激振法、定向爆破法两种震源产生的能量较大,能测试较深的钻孔,而单孔法目前普遍用击板法振源,其优点是简便易行,能得到两组 SH 波,缺点是能量有限,目前国内能测的深度为 100m 左右。

研究表明,板较长时,激振效果较好,但一方面是板过大、过长时,改善效果也有限,另外 SH 波源就不太符合“点源”的假设,同时振源的位置也不太好准确确定,对深度较小的测试可能会带来一定误差。美国 ASTM 规范说明普遍使用长 2.4m、宽 0.15m 的板。根据我国实际工程实践的情况,木板规格宜采用长 1.5m~3m,宽 0.15m~0.35m,厚 0.05m~0.20m 的坚硬木板。

利用电火花振源可同时取得 P 波及 S 波,但这种振源往往较易得到 P 波的初至时间,确定 S 波的初至时间较难。

压缩波振源要求激发能量大和重复性好。压缩波振源主要有炸药振源、电火花振源、锤击振源三种。理论上讲,在无限空间中爆炸振源不产生剪切波,因此炸药振源是很好的压缩波振源,尤其是适合深孔测试波速,但由于安全问题在城市勘察中已很少使用。电火花振源的主要优点是发射功率较大、传播距离远、方法简便和激发声波余震短等,其缺点是由于储电电容器等设备复杂笨重、现场需要交流电或发电机。普通电火花振源主要用于产生压缩波,通过用爆炸储能罩改进后,也可以产生丰富的剪切波。锤击振源是在地面上水平铺上钢板或铜铝合金板,板与土紧密接触,通过垂直锤击板产生压缩波(纵波)。锤击振源简单方便,但能量相对较弱,测试深度相对较小。

7.1.2 传感器一般应用三分量井下传感器,即在一密封、坚固的圆筒内安置 3 个互相垂直的传感器,其中 1 个是竖向的,2 个是水平向的,水平向传感器应性能一致。目前常用的是动圈型磁电式速度传感器(又称检波器),其特点是只有当所需测的振动的频率大于传感器固有频率时,传感器所测得的振动的幅值畸变及相位畸变才能小。结合我国目前使用的传感器的规格,规定传感器的固有频率宜不大于所测地震波主频的 $1/2$ 。土层宜采用固有频率小于 50Hz 的传感器,岩层宜采用固有频率为 100Hz 左右传感器。在用单孔法时,当所测深度很大时,地震波主频可能较低,此时宜采用固有频率较低的传感器。

在振源激发地震波的同时,触发器送出一个信号给地震仪,启动地震仪记录地震波。触发器的种类很多,有晶体管开关电路,机械式弹簧接触片,也有用速度传感器。触发器的触发时间相对于实际激发时间总是有延迟的,延迟时间的多少视触发器的性能而不同。即使同一类触发器,延迟时间也可能不同,要求延迟时间尽量小,尤其要稳定。

用单孔法时,延迟时间对求第一测点的波速值有影响,其他各测点的波速虽然是用时间差计算的,但由于不是同一次激发的,如

果延迟时间不稳定,则对计算波速值仍有影响。此外,如在同一孔工作过程中换用触发器,为避免由于前后两触发器延迟时间的不同造成误差,可以用后一触发器重复测试前几个测点的方法解决。

7.1.3 波速静力触探测试是在电测静力触探仪的基础上加上一套测量波速的装置,即在静力触探探头上部安装一个三分量检波器,采用检层法进行测试,可获得静探和波速两种资料。波速静力触探测试中的波速测试属于单孔法测试,自行成孔,检波器紧贴孔壁。其测试精度高,费用低,速度快,适宜层次少或土层软硬变化大的场地。

II 测试方法

7.1.4 单孔法按传感器的位置可分为下孔法及上孔法。传感器在孔下者为下孔法,反之为上孔法。测剪切波速时,一般用下孔法,此时用击板法能产生较纯的剪切波,压缩波的干扰小。上孔法的振源(炸药、电火花)在孔下,传感器在地面,此时振源产生压缩波和剪切波。本章只规定了最常用的下孔法。

单孔法波速测试孔成孔质量的好坏,会给所测的地层波速造成很大的实际误差,使测试结果完全失真。在城区工作时,现场经常有管道、坑道等地下构筑物,地表还有大量碎石、砖瓦、房渣土等不均匀地层,都不利于激发较纯的剪切波。因此在工作前应了解现场情况,使测试孔离开地下构筑物,并用挖坑放置木板的方法避开地下管道及地表不均匀层,减少它们的影响。

当钻孔必须下套管时,必须使套管壁与孔壁紧密接触,具体要求可参见“跨孔法”中的相关条文要求及条文说明。

一般情况下,根据现场条件确定木板离测试孔的距离 L 。虽然击板法能产生较纯的剪切波,但也会有少量压缩波产生,当木板离孔太近时,往往在浅处收到的剪切波由于和前面的压缩波挨得太近,而不能很好地定出其初至时间。

另一方面,当第一层土下有高速层时,则按斯奈尔定律,当入射角为临界角时,会在界面上产生折射波,如 L 值过大,则往往会

先收到折射波的初至,从而在求波速值时出错。因此,在确定 L 值时应注意工程地质条件。

木板必须与地面紧密接触。实际测试时,有将板底钉有许多钉尺片的做法,激振效果要比未经处理的普通板好得多。此外,在地面泼水或洒灰浆,也可增大板与地面接触的紧密程度。当地面不平时,宜采用刮平的方式,而不宜采用回填方式。

7.1.5 测试点的间隔根据地层界面情况而定。通常的做法是地下水水位以上平均每 $1\text{m}\sim 2\text{m}$ 一个测试点,地下水水位以下测试间隔可适当加大。界面处的测点需重复测试。

III 数据处理

7.1.7、7.1.8 在单孔法的资料整理过程中,由于木板离试验孔有一定距离 L ,因此产生两个问题:

其一,如果靠近地表的土层为低速层,下有高速层就会产生折射波,如图 2 所示。

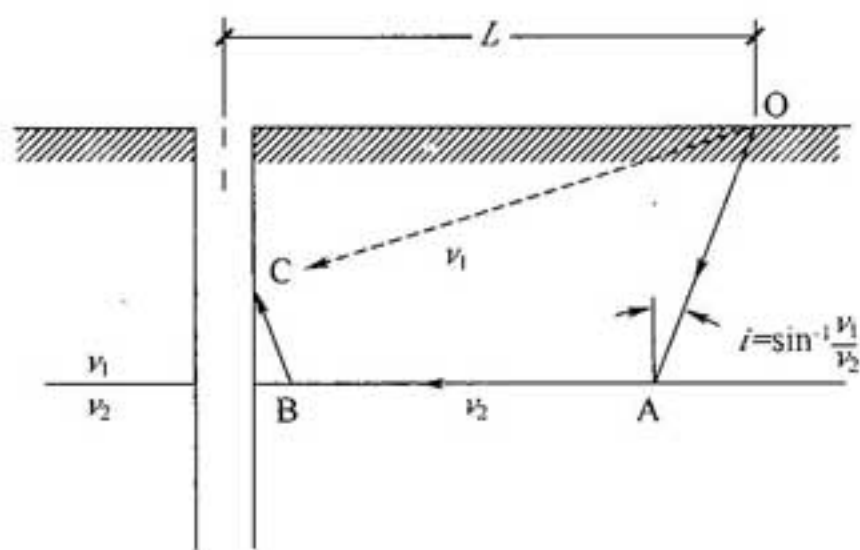


图 2 产生折射波的传播途径

图 2 中, O 点处为振源, C 点处为传感器, OC 为直达波传播途径, $OABC$ 为折射波传播途径。当 L 足够大时,波按 $OABC$ 行走的时间将小于按 OC 行走的时间,此时,如仍按直达波计算第一层波速将会产生误差。因此,除在规范中规定振源离孔的距离外,在资料整理中也应考虑是否存在这一问题。

其二,由于存在 L ,因此,在计算时不能直接用测试深度差除以波到达测点的时间差而得出该测试间隔的波速值,而必须做斜距校正。斜距校正的方法有多种,其原理大都是把波从振源到接收点的传播途径当作直线,再按三角关系进行校正,如图 3 所示:

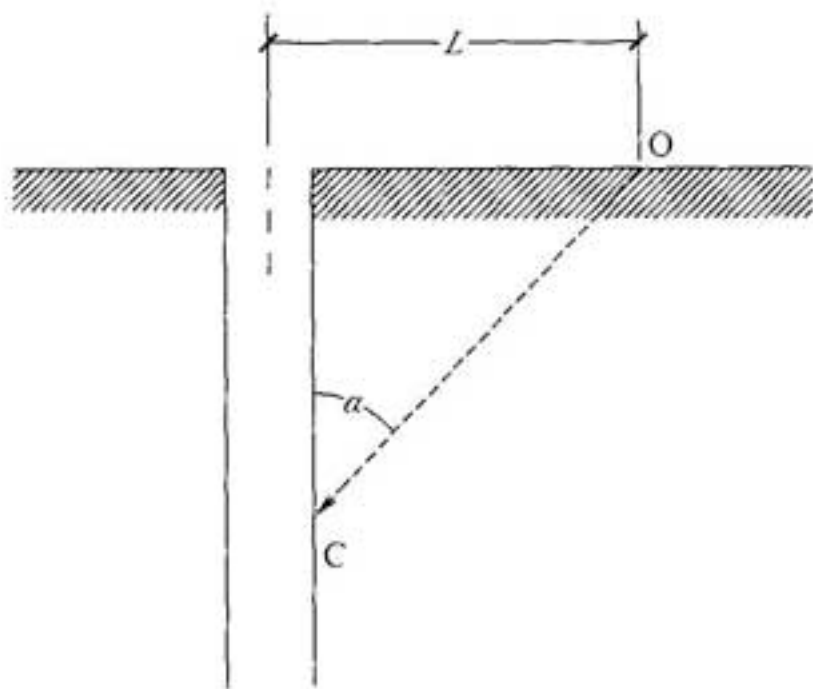


图 3 斜距按三角关系校正图

按这种假设进行的各种校正,虽然公式不同,实质都需计算出 $\cos\alpha$ 值,再进行下一步计算,其结果是一样的。本规范所用的校正方法是其中一种,虽然是近似方法,但简单易行,与有些学者提出的用最优化法按斯奈尔定理得到的结果差别不大。

7.2 跨孔法

I 设备和仪器

7.2.1 跨孔法目前较理想的振源是液压式井下剪切波锤,该设备能在孔内某一预定位置产生质点为上下方向振动的剪切波。该方法能产生极性相反的两组剪切波,可比较准确地确定波到达接收孔的初至时间,能在孔中反复测试。但要在振源孔下套管,并在套管与孔壁间隙灌注膨润土与水泥的混合浆液,花费较大,它所激发的能量较小。孔深时,由于连接锤的多条管线易缠绕,且随带油管的重量大,影响设备在孔中的准确定位及激振效果。

也可采用标准贯入装置,其优点是操作简单、能量大,适合于浅孔,但需要考虑振源激发延时对测试波速的影响。

高压电火花震源是良好的纵波震源,与机械震源相比要轻便得多,但若没有解决好定向性问题,则难以确定横波的初至时间。

7.2.2 跨孔法需要在两个孔内都安置三分量检波器,信号采集分析仪应在六通道以上,其他设备性能指标要求与单孔法相同。

II 测试方法

7.2.3 跨孔法有以下几种常见的布置方式:①双孔(一发一收);②直线三孔(一发两收);③L型五孔(垂直正交的两方向,共用一个震源孔,一发两收,用于各向异性的岩土体)。最初是用两个试验孔,一个振源孔,一个接收孔。这种方法的缺点是不能消除因触发器的延迟所引起的计时误差,当套管周围填料与土层性质不一致时,会导致传播时间有误差;当用标准贯入器作振源时,因为是在地面敲击钻杆,在计算波速时还应考虑地震波在钻杆内传播的时间。因此目前主张用3个~4个试验孔,排成一直线。当用3个试验孔时,以端点一个孔作为振源孔,其余2个孔为接收孔。在地层不均匀及进行复测时,还可以用另一端的孔作为振源孔进行测试。

一般试验孔宜选用等间距钻孔,这样不仅计算方便,还可以消除触发器的延时。

确定测试孔间距布置主要受地质情况及仪器精度的限制。当所要观测的地层上下有高速层时,可能产生折射波。在离振源距离大于临界距离时,折射波会比直达波先到达接收点,这时所接收到的就是折射波的初至,按这个时间计算出的波速将比实际地层波速值高。因此孔间距离不应大于临界距离(见图4),计算临界距离的公式为:

$$X_c = \frac{2\cos i \cos \varphi}{1 - \sin(i + \varphi)} H \quad (3)$$

$$i = \arcsin(v_1/v_2) \quad (4)$$

式中： X_c ——临界距离(m)；

H ——沿测试孔方向振源至高速层的距离(m)；

i ——临界角($^\circ$)；

v_1 ——低速层波速(m/s)；

v_2 ——高速层波速(m/s)；

φ ——地层界面倾角($^\circ$)，以顺时针方向为正。

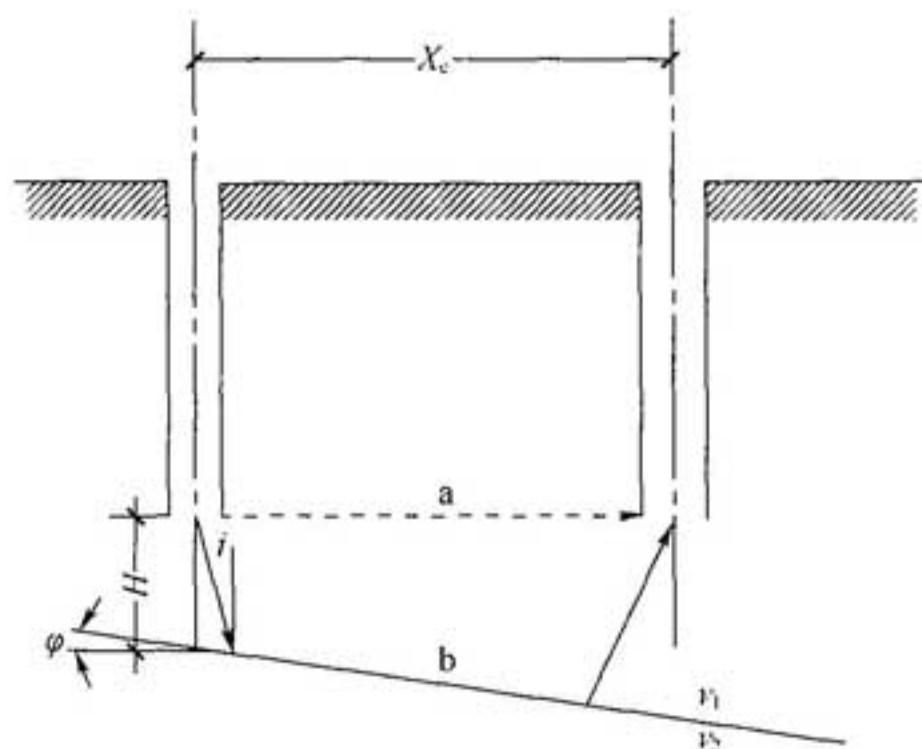


图4 直达波与折射波传播途径

a—直达波传播途径；b—折射波传播途径

计算的 X_c/H 值见表1。

表1 X_c/H 值的计算

φ \ v_1/v_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95
0°	2.2	2.4	2.7	3.1	3.2	3.5	3.7	4.0	4.3	4.8	5.3	6.0	7.0	8.7	12.5
10°	2.7	3.0	3.5	4.0	4.4	4.8	5.2	5.8	6.6	7.5	8.9	10.9	14.5	22.6	
20°	3.3	3.7	4.6	5.5	6.2	7.0	8.0	9.2	11.0	13.7	18.0	26.2	46.9		
30°	4.1	5.0	6.3	8.1	9.4	11.3	13.6	17.2	23.0	33.7	58.0				

另外，孔间距离太小，则所观测的由两振源到接收孔的地震波

传播时间太短,相对误差会增大,同时由于测试孔垂直度误差带来的误差也会增大,因此孔间距离也不宜太小。

测试孔间距应随地层波速的提高而增大。建议当地层为土层时(剪切波速度一般小于 500m/s);孔间距采用 2m~5m,其中一般黏性土层可取小值,砂砾石地层可取较大值。当地层为岩层时,应增大孔距。在岩层中采用爆炸、电火花等作为振源时,为能清楚分辨压缩波和剪切波应适当加大距离。

7.2.4 测试孔的要求:

垂直度:用作跨孔法波速试验的钻孔,对钻孔垂直度有很高的要求。当用跨孔法测试的深度超过 15m 时,为了得到在每一测试深度的孔间距的准确数据,应进行测斜工作,因测试孔很难保持竖直,只要一个孔有 1° 偏差,在 15m 时就会有 0.262m 的偏移,孔间距(以 4m 计)的误差就会达到 6.5%。

由于测斜工作比较复杂,且需精密仪器,一般单位并不具备,因此本条规定只限于深度大于 15m 的孔需测斜,但在测试孔较浅时应特别注意保持孔的竖直。

测斜工作对测斜仪的精度要求比较高。为使由于孔斜引起的误差小于 5%,要求测斜仪的灵敏度不小于 0.1° 。

7.2.6 采用一次成孔法是在振源孔及接收孔都准备完后,将剪切波锤及传感器分别放入振源孔及接收孔中的预定深度处,并固定于孔壁,再进行测试。可自上而下完成全部测试工作。

测试一般从地面以下 2m 深度开始,其下测点间距为 1m~2m。但也可根据实际地层情况适当增大间距或减小间距。为了避免相邻高速层折射波的影响,一般测点宜选在测试地层的中间位置。

为了保证测试精度,一般应取部分测点进行重复观测,如前后观测误差较大,则应分析原因,在现场予以解决。这种重复仅适用于孔下剪切波锤振源的情况,而无法对标贯器做振源的情况进行重复测试。

III 数据处理

7.2.8 按照实际测斜数据计算测点间的距离,对于跨孔法尤为重要。测斜管的安放不同,孔间距的计算方法也不同。

(1)使测斜管导向槽的方位分别为南北方向及东西方向,以北向为 X 轴,东向为 Y 轴,进行测斜得出每一测点在北向和东向相对于地面孔的偏移值 X、Y。则在某一测试深度,由振源孔到接收孔的距离为:

$$S = \sqrt{(S_0 \cos \varphi + X_j - X_z)^2 + (S_0 \sin \varphi + Y_j - Y_z)^2} \quad (5)$$

式中: S_0 ——在地面由振源孔到接收孔的距离(m);

φ ——从地面振源孔到接收孔的连线相对于北向的角度($^\circ$);

X_j, Y_j ——在接收孔该深度 X 和 Y 方向的偏移(m);

X_z, Y_z ——在振源孔该深度 X 和 Y 方向的偏移(m)。

(2)使测斜管一组导向槽的方位与测线(振源孔与接收孔的连线)一致,定为 X 轴,另一组导向槽的方位为 Y 轴。则振源孔和接收孔在某测试深度处的距离为:

$$S = \sqrt{(S_0 + X_j - X_z)^2 + (Y_j - Y_z)^2} \quad (6)$$

上述两方法中,第一种方法具有普遍意义,第二种方法则比较方便。

跨孔法资料整理中,当所测试的地层上下有高速层时,应注意不要将折射波的初至时间当作直达波的初至时间,以免得出错误的结果。可按下列方法判明是否有折射波的影响:

(1)计算出由振源到第一接收孔的波速值:

$$v_{P1} = S_1 / T_{P1} \quad (7)$$

$$v_{S1} = S_1 / T_{S1} \quad (8)$$

(2)计算出由振源到第二接收孔的波速值:

$$v_{P2} = S_2 / T_{P2} \quad (9)$$

$$v_{S2} = S_2 / T_{S2} \quad (10)$$

(3)计算出两接收孔之间的波速值:

$$v_{P12} = \Delta S / (T_{P2} - T_{P1}) \quad (11)$$

$$v_{S12} = \Delta S / (T_{S2} - T_{S1}) \quad (12)$$

在考虑到触发器延迟及套管等可能的影响因素后,如果波速值基本一致,可初步认为无折射影响。

(4)参考条文说明表 1,并利用直达波,一层折射、二层折射的时距曲线公式进行计算,以判明在各层(尤其是低速层)中,传感器所接收到的地震波的初至时间是否为直达波的到达时间。

(5)对有怀疑的地层做补充测试工作,例如:变化测试深度,变化振源孔的位置,单独变化振源或传感器的上下位置等,判明是否有折射现象存在。

7.3 面波法

I 设备和仪器

7.3.1 瞬态法设备轻便,应用比较广泛,理论研究也较深入,但空间分辨率相对较低;而稳态法空间分辨率高,但要求振源能量大,激振频率低,目前应用相对较少,但作为一种测试方法,这种方法也成功地应用于许多复杂工程,起到了瞬态法不可替代的作用。因此这两种方法可互为补充,应根据具体的工作要求、工作条件选用。

面波测试时,可以根据探测深度的要求来改善激振的条件:勘探深度较浅时,振源应激发高频地震波;勘探深度较深时,振源应激发低频地震波。同时,对于同种振源方式,改变激振点条件和垫板也可以改变激发的地震波频率。根据部分地区经验,振源的选择宜根据现场的探测深度要求和现场环境确定:探测深度 0~15m,宜选择大锤激振;0~30m 选择自由落锤激振;0~50m 以上选择炸药振源,在无法使用炸药的场地可以加大落锤的重量或提高落锤的高度以加大探测深度。

瞬态法的振源激发应根据测试深度和场地条件综合确定,以

保证测试所需的频率和足够的激振能量。使用锤击或夯击振源一般应铺设专用垫板。专用垫板硬度较大时,有利于激发高频波(深度小);专用垫板较软则有利于激发低频波(深度大)。同时,也可通过调整锤重或夯击能量的方式调整测试深度。

7.3.2 本条是面波法测试时所用到的仪器设备的基本要求。这些仪器设备主要包括面波仪和选用的检波器。对于岩土工程勘察,仪器放大器的通频带低频端不宜高于0.5Hz,高频端不宜低于4000Hz。接收低频信号选择具有较低固有频率的检波器,接收高频信号要选择具有较高固有频率的检波器。一般宜不大于4Hz。

II 测试方法

7.3.3 本条规定了稳态面波法数据采集时检波点距、采样间隔等关键参数选取时应当遵循的要求和方法。测试可以分为单端或双端激振法。当场地条件较简单时,可采用单端激振法,当场地条件复杂时可采用双端激振法。排列移动方式的选择应保证目的层的连续追踪。

影响多道瑞利波测试质量的因素很多,除了仪器、振源等本身的情况外,采集参数(空间采样点数、时间采样点数、检波器排列长度、偏移距、振源与检波器排列组合等)的合理设计是关键。

(1)偏移距:偏移距是影响瑞利波形成以及分离高阶模成分的重要因素,在设计偏移距时应充分考虑场地工作范围、振源能量和激发频带、最大和最小测试深度、道间距和测线排列长度等综合因素。偏移距的设计一般为0.3倍~2.0倍最大测试波长,推荐为不小于0.5倍最大波长为最好,相当于检波器排列长度,当重点测试浅部地层时可适当减小至小于0.3倍~0.5倍测线长度。当缺乏经验时,应在现场通过试验确定。

(2)空间采样率(即道间距)、采样点数(即检波器道数)和检波器排列长度共同控制了瑞利波测试的最小和最大有效深度,在实际测试中应根据测试目标的深度和规模综合设计采样点数、采样率,保证获得能够有效反映地层剖面结构的瑞利波波形信息。

7.3.4 面波靠近钻孔,可将测试结果和钻孔资料进行对比分析。

III 数据处理

7.3.5 瑞利波频散曲线的工程解译和应用中,频散曲线的“之”字形特征是重要的分层和解释依据,很多研究成果表明,频散曲线上的“之”字形异常反映了地下弹性接口的分界面,速度曲线突变的深度往往对应介质的接口深度,故一般可以作为划分地质接口的依据。但目前的研究尚未能给出其确切的成因和意义,它不仅与介质的结构变化有关,也与瑞利波的多阶模成分的相互干扰有关,与频散曲线提取原则具有密切关系,并不是所有的“之”字形拐点都可以作为工程解译的依据,因此本条规定应注意正确解译。

根据瑞利波采集数据进行瑞利波信号提纯和频散曲线提取是瑞利波测试中最重要的工作之一。目前关于提取频散曲线的方法主要有频率—波数谱($f-k$)变换法、慢度—频率($\tau-f$)变换法、互相关法、表面波谱分析方法、扩充 Prony 方法等。其中 $f-k$ 法能够较为可靠地分离各阶瑞利波成分,是目前比较成熟的数据处理方法,因此本规范推荐采用这种方法。

在进行面波探测成果解释时,明确提出应与钻孔或其他数据相结合。

7.4 弯曲元法

I 设备和仪器

7.4.1 弯曲元的核心是两片压电陶瓷片,一个作为激发元,一个作为接收元,它们能够实现机械能(振动波)与电能(电信号)之间的相互转化。其中激发元和接收元由两片压电陶瓷片(PZT)与中心金属加劲层叠合组成。

7.4.2 在现场试验中可以使用便携式弯曲元设备。

II 测试方法

7.4.3 应当将弯曲元一次性完全插入土中,以保证与土体良好接触;对粗颗粒土,应当注意弯曲元的保护,尽量避免弯曲元与有尖

角等突起的颗粒直接接触。

7.4.4 弯曲元的波形一般为简谐波,也有三角波、方波等特殊波;频率为决定输出波形是否清晰的主要因素,应该先粗调后微调,以保证输出波形足够清晰。

测试时宜进行三次激振,平行试验的测试结果极差不超过平均值的10%时,取平均值。应当对测试结果进行检测,查找原因,重新测试。

III 数据处理

7.4.5 在弯曲元试验中,主要有两种确定传播时间的方法,包括直接判别法(通过起始点、波峰或者零交叉点等特殊点判别的方法)与数学相互关系分析法。其中,数学相互关系分析法最为精确,但是操作繁琐,因此本规范建议使用时域初达波法进行判定。

8 循环荷载板测试

8.1 一般规定

循环荷载板测试是将一个刚性压板置于地基表面,在压板上反复进行加荷、卸荷试验,量测各级荷载作用下的变形和回弹量,绘制应力-地基变形滞回曲线,根据每级荷载卸荷时的回弹变形量,确定相应的弹性变形值 S_e 和地基抗压刚度系数。

8.1.1 在进行测试时,应尽可能将试验点布置在实际基础的位置和标高处。

8.2 设备和仪器

8.2.1 测试设备与静力荷载设备相同,有铁架载荷台,油压载荷试验设备,加荷可采用液压稳压装置,或在载荷台上直接加重物。

8.2.2 测试前应考虑设备能承受的最大荷载,同时要考虑反力或重物荷载,设备的承受荷载能力应大于试验最大荷载的 1.5 倍。

8.2.3 采用千斤顶加荷时,其反力可由重物、地锚、坑壁斜撑等提供。可根据现场土层性质、试验深度等具体条件按表 2 选用加荷方法。

表 2 各种加荷方法的适用条件

类型	适用条件
堆载式	设备简单,土质条件不限,试验深度范围大,所需重物较多
撑壁式	设备轻便,试验深度宜在 2m~4m,土质稳定
平洞式	设备简单,要有 3m 以上陡坎,洞顶土厚度大于 2m,且稳定
锚杆式	设备复杂,需下地锚,表土要有一定锚着力

8.2.4 观测变形值可采用 10mm~30mm 行程的百分表,其量程较大,在试验中不需要经常调表,可减少观测误差,提高测试精度。

有条件时,也可采用电测位移传感器观测。

8.3 测试前的准备工作

8.3.1 测试资料表明,在一定条件下,地基土的变形量与荷载板宽度成正比关系,当压板宽度增加(或减少)到一定限度时,变形不再增加(或减小),趋于一定值。对荷载板大小的选择,各国也不相同,美、英、日等国家,偏重使用小压板,原苏联等国家一般规定用 0.5m^2 ,亦有用 0.25m^2 (硬土)。我国多采用 $0.25\text{m}^2\sim 0.5\text{m}^2$ 。

8.3.2 鉴于地基的弹性变形、弹性模量和地基抗压刚度系数与地基土性质有关,如果承压板下面的土与拟建基础下的土性质不同,则由试验资料计算的参数不能用于设计基础,因此承压板的位置应选择在设计基础附近相同土层上。

8.3.3 试坑底面宽度应大于承压板直径的3倍,根据研究结果表明:在砂层中,不论压板放在砂的表面,还是放在砂土中一定深度处,在同一水平面上,最大变形范围均发生在0.7倍~1.75倍承压板直径范围,超过压板直径3倍以上,土的变形就极微小了。另外一些试验资料表明,坑壁的影响随离压板的距离增加而迅速减小,当压板底面宽度和试坑宽度之比接近1:3时,这样影响就很小,可以忽略不计。

8.3.4 为了防止加载偏心,千斤顶合力中心应与承压板的中心点重合,并保证力的方向和承压板平面垂直。

8.4 测试方法

8.4.5 测试时,先在某一荷载下(土自重压力或设计压力)加载,使压板下沉稳定(稳定标准为连续2h内,每小时变形量不超过 0.1mm)后,再继续施加循环荷载,其值按条文中的表8.4.2选取,也可按土的比例界限值的 $1/10\sim 1/12$ 考虑选取,观测相应的变形值。每次加荷、卸荷要求在10min内完成(即加荷观测5min,卸荷回弹观测5min)。

单荷级循环法:选择一个荷级,以等速加荷、卸荷,反复进行,直至达到弹性变形接近常数为止,一般黏性土为 6 次~8 次,砂性土为 4 次~6 次。

多荷级循环法:选择 3 个~4 个荷级,每一荷级反复进行加荷、卸荷 5 次~8 次,直到弹性变形为一定值后进行第 2 个荷级试验,依次类推,直至加完预定的荷级。

变形稳定标准:考虑到土并非纯弹性体,在同一荷载作用下,不同回次的弹性变形量是不相同的。前后两个回次弹性变形差值小于 0.05mm 时,可作为稳定的标准,并取最后一次弹性变形值。

8.5 数据处理

8.5.1 试验数据经计算、整理后,绘制 P_L-t 、 $S-t$ 、 $S-P_L$ 、 S_e-P_L 关系曲线图,可分开绘制,也可合起来绘制。

8.5.2 加荷后,地基土产生变形,即包含了弹、塑性变形,称之为总变形;而卸荷回弹变形,可认为是弹性变形值。

8.5.4 地基弹性模量可按弹性理论公式进行计算,关键是要准确测定地基土的弹性变形值。对于地基的泊松比值,可以进行实测,也可按表 3 数值选取。密实的土宜选低值,稍密或松散的土宜选高值。

表 3 各类土的泊松比值

地基土的名称	卵石	砂土	粉土	粉质黏土	黏土
μ	0.2~0.25	0.30~0.35	0.35~0.40	0.40~0.45	0.45~0.50

8.5.5 地基刚度系数是根据循环荷载板试验确定的弹性变形值与应力的比值求得。该方法简单直观,比较符合地基土的实际状况。

9 振动三轴测试

9.1 一般规定

土质地基、边坡以工程建(构)筑物在地震和其他动荷载作用下的动力反应分析和安全评估,需要有土的动变形和强度性质参数。在实验室内测试地基土动力性质的方法有很多种,包括动三轴、动单剪、动扭剪、共振柱和超声波速测试等方法,各有优缺点。目前,国内外在工程实际中应用最广的是本章的振动三轴测试和第10章的共振柱测试这两种方法。

9.1.1 土的动力特性参数的确定则取决于所选用的力学模型。在循环作用应力下,土的力学模型很多,但当前较成熟且在国内外工程界应用最广的是等效粘弹体模型,本章以这一模型为理论基础来测定土的动剪切模量、动弹性模量和阻尼比。另外,动三轴试验还可用于测定土的动强度(含饱和砂土的抗液化强度)和动孔隙水压力。

9.1.2 动三轴试验不但可用来对常用力学模型测定土的动力特性参数以供工程设计分析之用,而且还可以根据科学研究探索的需要,对土样的初始应力状态、排水条件和激振方式等按特殊的要求进行试验。本条款涉及的测试报告内容,主要是针对前者而规定的。

9.2 设备和仪器

9.2.1 按驱动方式划分,动三轴仪包括电磁式、液压式、气压式和惯性式。测试中所选用的动三轴仪应满足有关仪器设备和基于测试目的所需激振能力的基本要求。

9.2.2 激振方式及其特性对土的动力特性影响较大。为更好地

反映土的动力特性,振动三轴测试的主机动力加载系统,宜具有按给定任意数字信号波形进行激振的能力。

9.2.3 振动三轴测试的主机动力加载系统,在以正弦波形式激振时,实际波形应对称,且其拉、压两个半周的幅值和持时的相对偏差均不宜大于 10%。

9.2.4 振动三轴仪能够实测的应变幅范围一般为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$,精度高的能测至 10^{-5} 的低应变幅。由于土的应力-应变关系具有强烈的非线性特点,因而要求在工程应用对象动力反应分析所需要的应变幅范围内,通过适当的实验设备实测土的动模量、阻尼比或动强度、动孔压。当需要测试更宽应变范围土的动参数时,应与共振柱试验等进行联合测试。振动三轴仪实测的应变幅范围的上限值,应能满足达到土的动强度所对应的破坏标准的要求。

9.3 测试方法

9.3.3 现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 提出了 3 种饱和土试样的方法,即抽气饱和、水头饱和与反压力饱和。当采用抽气饱和时,该标准要求饱和度不低于 95%;当采用反压力饱和时,该标准认为,孔隙水压力增量与围压增量之比大于 0.98 时试样达到饱和。在室内测试饱和砂土、粉土的动力特性时,试样必须充分饱和,以避免少量含气对其试验结果产生明显的影响。但考虑到饱和黏性土试验饱和时间偏长以及对试验结果的影响相对较小,本条款对其在周围压力作用下的孔隙水压力系数要求放松到不应小于 0.95。

9.3.4 试验的固结应力条件,包括初始剪应力比与固结应力的选用,应使试验结果能满足所试验土样在地基或边坡土中受力范围的要求。对试样个数的规定,主要是为了对测试结果进行统计分析和总结规律的需要。

9.3.5 在试样完成静力固结后,应测量试样的排水量和长度变化,并由此计算振动试验前试样的干密度和试样长度,后者是计算

动轴向应变的一个依据。

9.3.6、9.3.7 如果在一个试样上施加多级动应变或动应力以测定动模量和阻尼比随应变幅的变化,可以节省试验工作量,对于原状土还可节省取样数量和解决土性不均匀问题。但是,这样做有可能因预振造成孔隙水压力升高而影响后面几级的试验结果。为减少预振影响,应尽量缩短在每级动应变或动应力下的测试时间,规定了动应力的作用振次不宜大于5次,且宜少不宜多。至于对同一试样上允许施加动应变或动应力的级数,因具体情况多变,难以作出统一的合理规定,条文只提出了控制原则。

9.3.8 在未配备振动扭剪仪和振动单剪仪的实验室,只能用振动三轴仪实测动弹性模量。因此,本条允许在动剪切模量与动弹性模量之间相互换算,同时亦允许在剪应变幅与轴应变幅之间相互换算。

9.3.9 在较大的变化范围来看,振动频率对土的动强度、动孔压和抗液化强度是有一定影响的。以往动三轴试验主要用于测试土受地震动作用的特性,大多实验室配备的动三轴仪的可测振动频率较低,由此总结出土的动力特性受振动频率影响的规律,是否适用于解决高铁、地铁运行振动和其他工业设备运行等产生的高频振动问题,需要研发高频土动三轴仪进行试验研究予以论证。

9.3.11 对于确定动强度的破坏标准,可在动应变幅 $2.5 \times 10^{-2} \sim 10.0 \times 10^{-2}$ 范围内选定,其中对重要工程取较小的数值。如果在开始做某一工程地基土的测试工作时,尚未能对破坏标准做出明确选择,则可根据地基土的性质、工程运行条件或动荷载的性质以及工程的重要性,选用1种~2种甚至3种破坏标准进行试验并整理成果,供进行设计分析时选用。

9.3.12 在振动三轴试验过程中,目前普遍采用的是单向正弦波形式的循环应力,而实际工程中有些重要的动荷载(如地震作用)具有很强的随机性和多频率成分。这样,在室内测试土的动强度时就有了等效循环应力和等效破坏振次的概念。如果实际工程中

的动荷载也是正弦波,则等效破坏振次就是实际动荷载的循环作用次数。对于地震作用,目前普遍采用的等效破坏振次与地震震级相关,如表 4 所示,可供进行土的动强度试验时参考。与表中所列等效破坏振次相对应的正弦波的等效循环剪应力幅,是地震作用产生的最大动剪应力的 65%。

表 4 地震作用的等效破坏振次和参考持续时间

地震震级 M	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
等效破坏振次 N_{eq}	5	8	12	15~20	26~30
持续时间(s)	8	14	20	40	60

9.4 数据处理

9.4.2 在动三轴仪上测试土样的动弹性模量和阻尼比,对所测得的数据进行处理分析时,均以土的力学模型是理想粘弹体模型为基础,同时考虑土的动模量与阻尼都随动应变而变化以反映土的应力-应变关系的非线性特征。

9.4.7 根据基本概念和计算简图,本条款中的动内摩擦角 φ_d 是总应力抗剪强度的一个指标。而由试验结果,土的动内摩擦角与静内摩擦角相差较小,可参照静三轴试验结果取值。

9.4.11 在动三轴仪上测试土的动强度或抗液化强度,是目前国内外应用最广的一种方法。根据动三轴仪中试样的受力条件,用潜在破坏面上的应力状态整理其总应力抗剪强度指标,在概念上较合理,实际应用也较广。因此,本章建议采用这一方法。另外,本规范条文中式(9.4.7-3)适用于 $\alpha_0 \geq 0.15$,式(9.4.8)适用于 $\alpha_0 = 0$;当 $0.15 > \alpha_0 > 0$ 时,可用线性插入法取值。

9.4.12 有效应力法分析土体动力反应和抗震稳定,已是一种发展趋势,如现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 中要求在对尾矿坝进行地震稳定分析时考虑地震引起的孔隙水压力。因此,本章列入了饱和土动孔隙水压力测试。

10 共振柱测试

10.1 一般规定

共振柱测试是根据线性粘弹体模型由实测数据来计算土的动弹模和阻尼比的,因此要求黏性土、粉土土和砂土试样在试验中承受的应变幅一般不超过 10^{-4} 。

10.1.1 由于各自测试应变幅范围的限制,往往需要将共振柱测试和振动三轴测试的结果进行综合,才能获得较为完整的动剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的关系曲线,或动弹性模量比、阻尼比对轴应变幅的关系曲线。

10.2 设备和仪器

10.2.1 扭转向激振与纵向激振的激振端压板系统,无弹簧-阻尼器与有弹簧-阻尼器的各种类型共振柱仪都可以采用,但须各自进行有关参数的率定。

10.2.3 共振柱仪能够实测的应变幅范围一般不超过 10^{-4} ,当需要测定更大应变范围内土的等效粘弹性模型中的动弹模和阻尼比时,可与动三轴试验进行联合测试。

10.3 测试方法

10.3.5 如果在一个试样上施加多级动应变或动应力以测定动模量和阻尼比随应变幅的变化,可以节省试验工作量,对于原状土还可节省取样数量和解决土性不均匀问题。但是,这样做有可能因预振造成孔隙水压力升高而影响后面几级的试验结果。为减少预振影响,应尽量缩短在每级动应变或动应力下的测试时间,这就要求共振柱仪操作人员必须有一定的熟练程度。至于对同一试样上

允许施加动应变或动应力的级数,因具体情况多变,难以作出统一的合理规定,本条文只对试验在测试中出现的孔压和最大应变提出了控制原则。

10.4 数据处理

10.4.3 在激振力幅一定的条件下,测得试样系统扭转振动的幅频曲线如图 5 所示,由其峰点确定共振频率 f_r 。第 10.4.6 中的 f_1 确定方法与此类似。

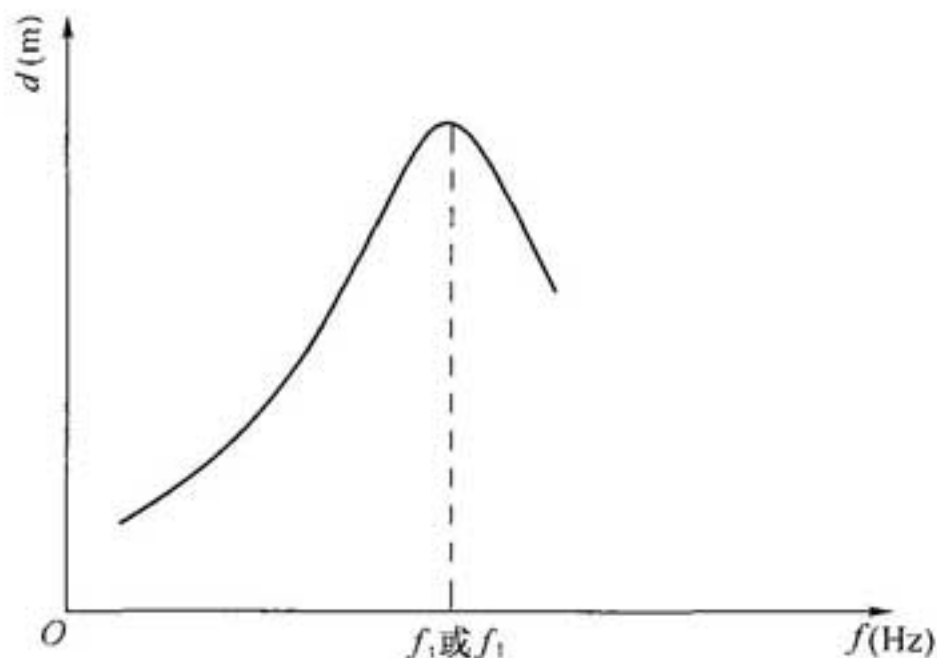


图 5 试样系统稳态强迫振动幅频曲线

10.4.5 在自由振动条件下,测得试样系统扭转振动随时间的变化曲线如图 6 所示。按线性粘弹体模型,若将横轴(时间)采用对数坐标,则其峰点可拟合成一条直线,其斜率便称为试样系统扭转自由振动的对数衰减率 δ_1 。当采用式(10.4.5-2)时,宜采用多个 n 值计算,并将其平均值作为要求的对数衰减率。第 10.4.8 中的 δ_1 确定方法与此类似。

10.4.10 整理最大动剪切模量或最大动弹性模量与有效应力的关系时,早期都采用了八面体平均应力。近些年来,已有较多的工作证明,最大动剪切模量只与在质点振动和振动传播两个方向上作用的主应力有关,而几乎不受作用在垂直振动平面上的主应力

影响。动三轴仪中试样受轴对称应力,是二维问题;而大量的动力反应分析工作也是二维分析。因此,本章规定,对二维与三维条件,可分别采用本条文中符号说明的方法计算平均固结应力。在整理最大动模量与平均固结应力之间关系的经验公式(10.4.10-1)和(10.4.10-2)中,都引入了大气压力项,以使系数 C_1 、 C_2 成为无量纲的反映土性质的系数。

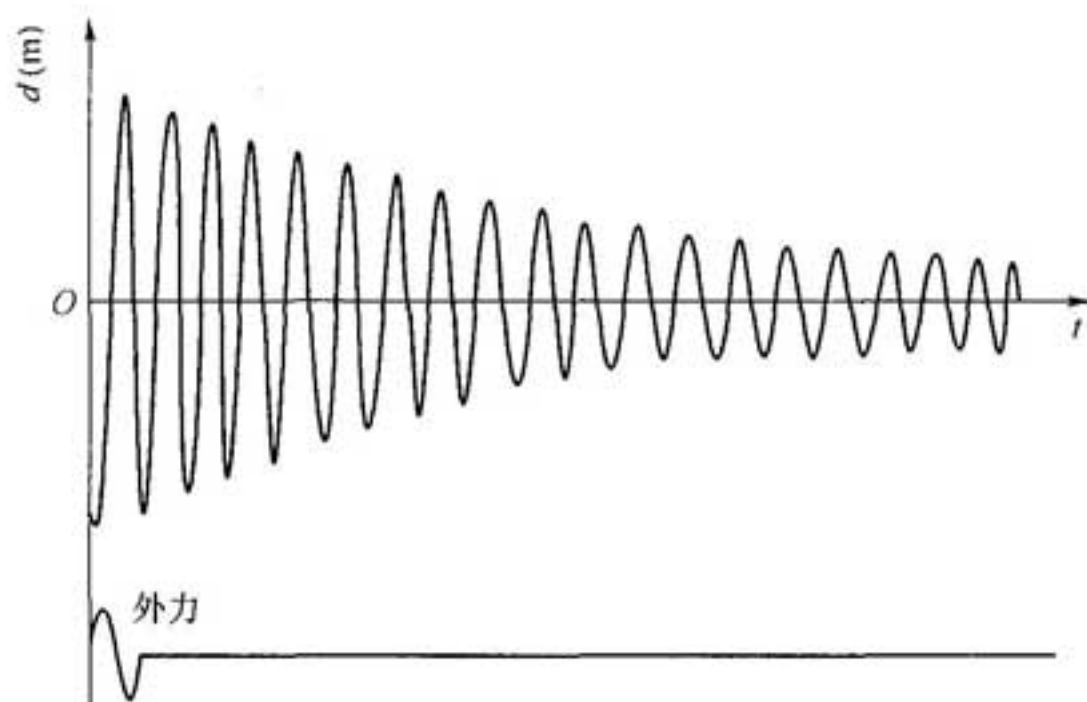


图 6 试样系统自由振动信号

11 空心圆柱动扭剪测试

11.1 一般规定

由于天然土体往往存在各向异性,不同方向上土体的力学性状和参数不同,动三轴仪难以进行土体各向异性的研究,而空心圆柱动扭剪仪则是研究土体各向异性的非常实用的仪器。

空心圆柱仪能够独立控制轴力 W , 扭矩 M_T , 内压 p_i 与外压 p_o , 从而对圆筒状土体单元施加一组独立的应力分量, 即单元体轴向应力 σ_d 、环向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 以及垂直于径向平面的剪应力 $\tau_{\theta r}$, 恰与研究平面主应力轴旋转时所需的大、中、小主应力以及大主应力旋转角四个独立变量形成映射关系(图 7), 从而达到模拟复杂应力路径的要求。

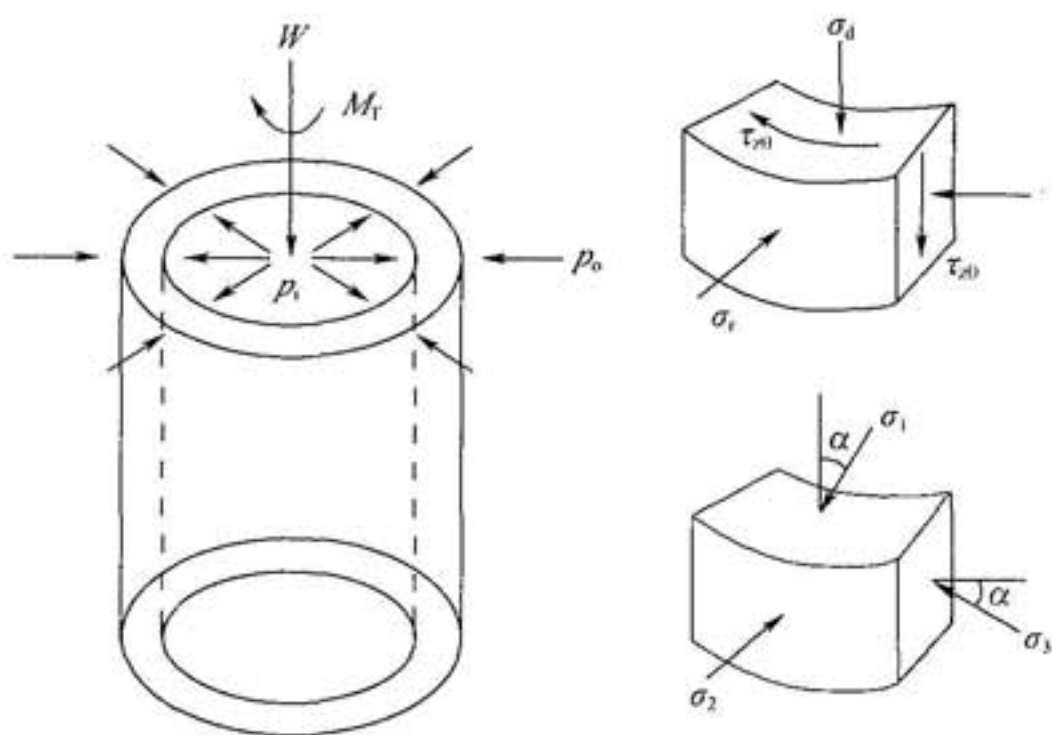


图 7 空心圆柱扭剪原理图

与常规三轴试验相比,空心扭剪试验具有以下优点:试样为空心薄壁,应力应变分布更均匀;试验过程中可以实现主应力轴连续

旋转;可以任意控制中主应力 σ_2 的大小;可以实现非三轴复杂应力路径试验。

11.1.1 在以往的地震反应分析中,认为地震作用以水平剪切为主,故简化为单向激振循环荷载条件采用动三轴仪测试来模拟地震运动。然而在近场地震作用下,竖向地震力的作用也是不容忽视的,在这种情况下,采用动扭剪测试实现偏应力与剪应力耦合的荷载作用方式来模拟地震作用更符合实际情况。

主应力方向旋转变化是波浪、交通荷载作用下地基土体所受应力路径的主要特征,其对土体的影响与主应力轴定向剪切应力路径有着显著差别。动三轴仪只能控制围压和轴向偏应力两个变量,无法模拟主应力轴方向旋转变化,而空心圆柱仪则是模拟主应力轴方向旋转变化的最有效的试验仪器。

11.2 设备和仪器

11.2.1 测试设备由压力室、轴向和旋转双驱动设备、内(外)周围压力系统、反压力系统、孔隙水压力量测系统、轴向和扭转变形量测系统和体积变化量测系统等组成。测试设备中的加压和量测系统均没有规定采用何种方式,因为空心圆柱仪在不断改进,只要设备符合试验要求均可采用。

空心圆柱扭剪系统的核心部分是加载和测量系统,这两部分的精度决定了空心圆柱扭剪系统的性能,而信号控制与转换系统为数据的输出和采集提供了基础。

11.2.3 应力路径对土的动力特性影响较大。实际工程中,土体所受动力荷载的形式是复杂多变的,仅通过施加常规的正弦波或三角形波难以模拟真实的应力路径。空心圆柱仪的主机动力加载系统,应具有按给定任意数字信号波形进行激振的能力。

11.2.4 为了减小曲率效应和端部效应对试验结果的影响,试样的几何尺寸应满足第 11.2.4 条的规定,以保证试验结果的合理性。

11.2.5 空心圆柱仪能够实测的应变范围与振动三轴仪相近,一

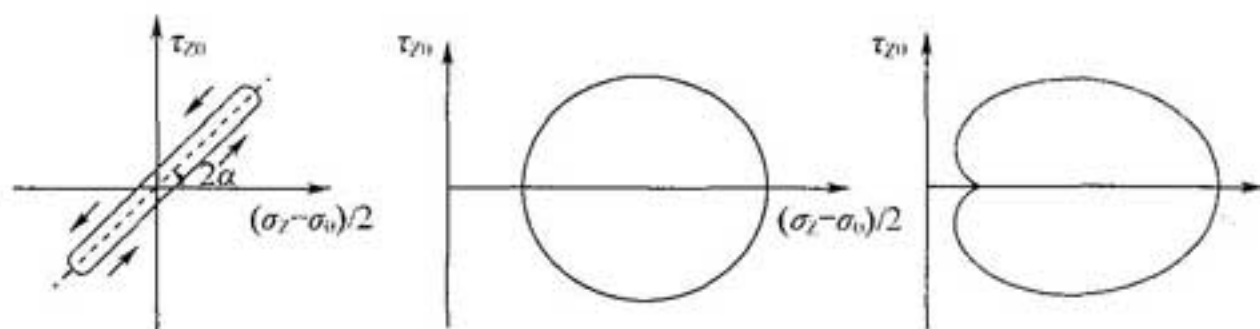
一般为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 。

11.3 测试方法

11.3.2 原状试样制备过程中,应先对土样进行描述,了解土样的均匀程度、含杂质等情况后,才能保证物理性试验的试样和力学性试验所选用的一样,避免产生试验结果相互矛盾的现象。

现有的内芯切取法主要有机械式和电渗式两种。机械式适用于强度较高的黏性土,利用 7 个直径不同的钻刀,从小到大依次对试样进行取芯,通过渐进式地修正达到设计空心内径的要求。电渗法适用于含水量高达 80%~100% 的软土,对试样施加直流电源正负两极,利用电势降使试样中的水从正极流向负极,产生润滑作用,把一根由探针引导穿过试样正中的电线连上负极,利用张紧的电线切割内壁,如此内芯与试样孔壁在润滑作用下较易分离,对试样的扰动也小。

11.3.6 针对不同的工程对象,动力试验中应选用相应的真实应力路径。试验中通过控制轴力和扭矩的加载波形,即可得到不同的应力路径。对经受地震、波浪和交通等动力作用的工程土体在 $\tau_{20} - (\sigma_z - \sigma_0)$ 平面上的应力路径分别如图 8-(a)、8-(b)、8-(c) 所示。



(a)地震作用应力路径 (b)波浪作用应力路径 (c)交通作用应力路径

图 8 地震、波浪、交通作用应力路径

11.4 数据处理

11.4.6 由于空心圆柱扭剪仪既可以像动三轴仪一样测量试样的轴向动应力-动应变,又可以同时测量试样的剪切动应力-动应变,因此空心圆柱扭剪仪可同时求得试样的动弹性模量和动剪切模量。

11.4.7 动三轴仪只能独立控制轴向偏应力和围压两个加载参数,定义强度比时动应力仅为轴向偏应力,即最大主应力与最小主应力之差,不能考虑中主应力的影响。空心圆柱仪能够独立控制轴力 W , 扭矩 M_T , 内压 p_i 与外压 p_o , 可以对立控制三个大主应力的大小和方向。因此,采用空心圆柱仪定义的强度比考虑了中主应力的影响,更加符合工程实际受力状态,其取值也更为准确。