

桩底持力层与桩身倾斜度测试方法技术研究

邓业灿,李毅臻,鲁传恒,黄汉平
(广东省工程勘察院,广州 510510)

摘要:阐述了桩底持力层与桩身倾斜度测试原理及方法,列举了倾斜情况下的标准件试验及倾斜模型桩试验结果与工程应用实例。

关键词:持力层;倾斜度;反射波;绕射波

中图分类号:P631.4;TU47 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2002)03-0240-07

基桩是建筑物结构的重要组成部分,它承受建筑物的全部荷载并将其传递给地基,因此基桩质量的好坏,直接关系到建筑物的安全。在桩基施工过程中,特别在灰岩地区与软土地区,由于基底溶洞的存在与软土地层的易挤性,使部分工程桩出现桩底溶洞、软夹层及基桩倾斜现象,有的倾斜甚至可达 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,使桩的竖向承载能力大大降低,给建筑物留下严重的安全隐患。为此,广大质监、监理及设计人员迫切希望有一种有效而又快捷的桩底持力层与桩身倾斜测试方法,为桩底持力层软硬程度的判断与基桩倾斜度的确定提供科学依据,笔者所从事的试验与研究,正是基于此目的开展的。

1 基本原理

纵波是介质中传播最快的波,其传播速度为

$$v_p = \sqrt{(\lambda + \mu) / \rho} \quad (1)$$

式中, λ 为拉梅系数; μ 为剪切模量; ρ 为介质密度。不同的地层或介质常具不同的波阻抗和波速,其不同物理性质的界面常是岩层或介质的界面。地震波在这类物性界面上将发生反射和透射现象(图 1)。

假设地下有 2 个水平地层,第 1 层密度为 ρ_1 ,波速为 v_1 ,第 2 层的密度为 ρ_2 ,波速为 v_2 ,并且 $\rho_1 v_1 \neq \rho_2 v_2$,即界面 R 为波阻抗界面(图 2)。在地面 O 点激震,地震波射线垂直入射到界面上,即入射角 $\alpha = 0$,根据反射定理,则反射角 $\beta = 0$,就是说它又垂直返回地面的激发点,在地面处安放 1 个拾震器,记录下这个波垂直旅行时间 t_0 ,就可以根据公式(1)计算出界面的埋藏深度 $h = v_1 t_0 / 2$ 。

如果在地面布置一条通过 O 点的直线 X (测线),在测线上 A, B, C, \dots 各点上都安放上拾震器,记录自 R 界面 a, b, c, \dots 各点反射波的到达时间,按各点间的几何关系和时间。同样可以求得 a, b, c 各点的深度。对于正常的混凝土桩,砼密度一般为 $2.4 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$,纵波速度 $3300 \sim 4100 \text{ m/s}$;而对于坚硬岩石来说,密度约为 $2.7 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$,纵波速度为 $2500 \sim 6000 \text{ m/s}$;对于亚粘土、砂土等来讲,其密度一般为 $1.75 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$,纵波速度为 $300 \sim 900 \text{ m/s}$ 。各种介质存在明显的波阻抗差异是用反射及绕射波法测定桩底持力层力学性质与桩身倾斜度的地球物理前提。

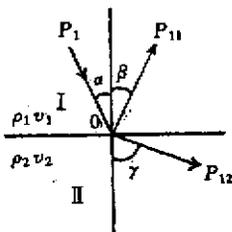


图 1 波的反射与透射

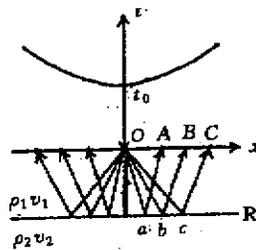


图 2 反射波法的基本原理

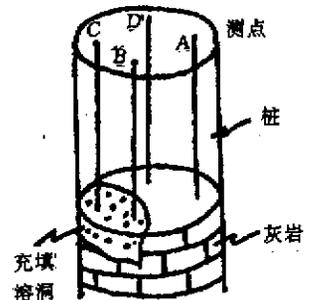


图 3 测点布置

2 桩底持力层性质的划分

根据反射波法原理,在桩顶按东、南、西、北方向安放拾震器,分别在不同点上激震,即可根据反射波接收曲线的时间 t_0 及反射波的相位特征及幅值特征,分析出桩底部不同部位的软硬情况(图 3)。

2.1 反射波相位分析

根据反射系数公式

$$R = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (2)$$

当 $Z_1 > Z_2$ (入射波由密介质向疏介质投射)时, R 为正值,表示桩底反射波与入射波同相;当 $Z_1 = Z_2$ (上下介质波阻抗相等)时, $R = 0$, 桩底无反射。当 $Z_1 < Z_2$ (入射波由疏介质向密介质投射)时, R 为负值,表示桩底反射波与入射波反相。

2.2 幅值分析

同一工地,在震源能量、仪器参数确定的情况下, $\rho_1 v_1$ 与 $\rho_2 v_2$ 上下介质波阻抗差别越大,则反射波愈强,其反射波幅值越大,反之,其幅值就小。

3 桩身倾斜度的估算

3.1 测试原理

依惠更斯原理,在弹性介质中,波动传到各点,

不论在同一波阵面或不同波阵面上,都可以看作是发射子波的波源,在任一时刻,所有这些子波的包迹就是新的波阵面。大量模型试验表明,混凝土材料本身对应力波衰减的影响很小,桩周土阻力对应力波衰减的影响非常大。当在 O_1 点激发,地震波射线垂直入射到 A 点,根据惠更斯原理则可以将介质上的 A 看成一个新震源,由该点产生一个新的振动向四周介质传播,而在 v_1 介质中,新扰动以 v_1 速度传播,在 v_2 介质中按 v_2 速度传播(图 4)。

射线原理(费玛原理)告诉我们,波沿射线路径传播所需要的时间最短。上述原理不仅适用于均质介质,同样适用于非均质介质。根据上述两原理,在桩顶部按不同方向安放拾震器,分别激振,即可分别接收到桩周 A 、 B 点上射线返回的旅行时 t_{01} 、 t_{02} 。结合各方向波形曲线特征则可推断出桩的大致倾斜方向及估算出桩身倾斜度。图 5a、b 为 O_1 、 O_2 点所测曲线示意图。从图上可查出 t_{01} 、 t_{02} , 利用下公式即可估算出

$$h_1 = (v_1 t_{01})/2; \quad h_2 = (v_1 t_{02})/2; \quad (3)$$

$$h' = h_2 - h_1. \quad (4)$$

用图解法或计算法,均可估算桩身倾斜角 β (图 6)

$$\text{ctan}\beta = h_1/\Delta x. \quad (5)$$

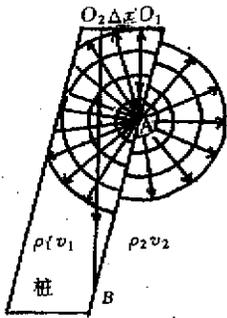


图 4 波前原理

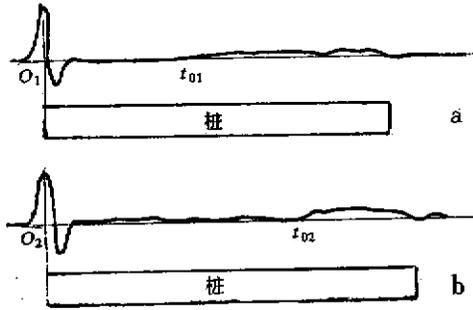


图 5 桩顶 O_1 点和 O_2 点所测曲线示意

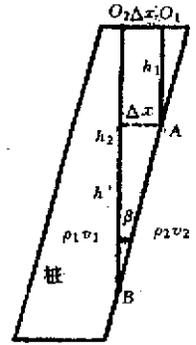


图 6 桩身倾斜角 β 的估算

3.2 绕射波的形成与分析

地震波在传播过程中,遇到断层的棱角、地层尖灭点、介质尖灭点、不整合面的突起点等物性显著变化的地方,将以这些“棱”、“角”、“点”作为一个新的震源产生振动,向周围传播,此现象称为绕射,所形成的新波称绕射波。如图 7 所示,从震源点 O 出发的入射波到达绕射点 A ,以 A 点作为新震源产生振动,向周围传播,然后以绕射波形式至地面的任意观测点 D 。显然,波的旅行时是由入射波射线 OA 所需的时间 t_1 和绕射波射线 AD 传播的时间 t_2 组成。

$$t_1 = \frac{AO}{v_1} = \frac{1}{v_1} \sqrt{L^2 + h^2}, \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{AD}{v_1} = \frac{1}{v_1} \sqrt{(x-L)^2 + h^2}, \quad (7)$$

其中, L 为 A 点在地面投影点与震源点 O 之间的距离, h 为绕射点的深度。于是绕射波传播的总时间

$$t = t_1 + t_2 = \frac{1}{v_1} (\sqrt{L^2 + h^2} + \sqrt{(x-L)^2 + h^2}). \quad (8)$$

当 $x = L = 0$ 时, $t = t_0$, $h = h_0$ 则:

$$t_0 = \frac{1}{v_1} (h_0 + h_0) = \frac{2h_0}{v_1}, \quad (9)$$

即
$$h_0 = \frac{1}{2} v_1 t_0 \quad (10)$$

由上式可求出绕射点 A (即桩周侧面 A 点)至震源点 O 的距离 h_0 。

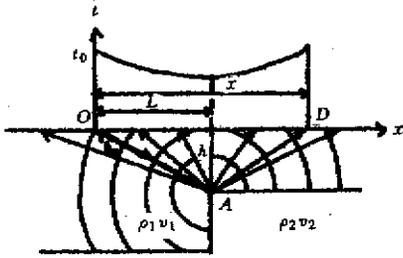


图7 绕射波及其时距曲线

3.3 标准件试验

试验件为圆铁棒且悬空地面。

3.3.1 试验1

斜面圆铁棒 $\phi 13$ cm,长 5.80 m,斜角 5° ,测试点和实测曲线见图 8。曲线特征:起跳后在零线下出现一段较平直线,总体呈宽“U”型曲线特征。桩底反射信号被削弱。

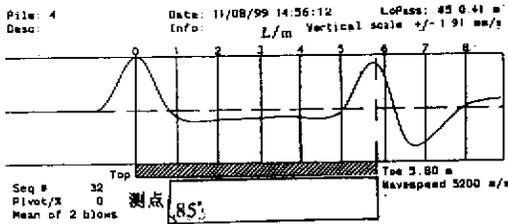


图8 试验1结果

3.3.2 试验2

斜面圆铁棒 $\phi 11$ cm,长 7.8 m,斜角 11° ,测试点及实测曲线见图 9。曲线特征:起跳后在零线下出现一段平直线段后出现下凹曲线特征,桩底反射信号被进一步削弱。

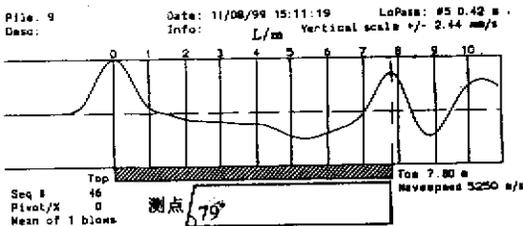


图9 试验2结果

3.3.3 试验3

平面圆铁棒 $\phi 10$ cm,长 5.51 m,斜角 0° ,测试点及实测曲线见图 10。曲线特征:在起跳与杆底反射波之间,曲线对称,呈宽对称“凸”型曲线特征,桩底反射信号较强。

综上所述可见,当试件倾斜角度越大,则速度曲

线下凹幅越大,杆底反射强度(幅值)越小;反之试件倾斜角越小,则速度曲线下凹幅越小,杆底反射强度(幅度)越大,如 PIT 试验曲线示意(图 11)。

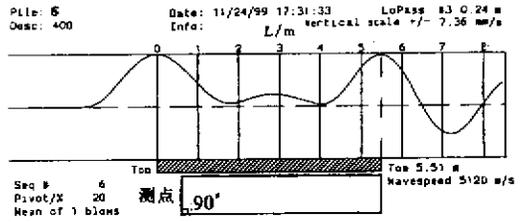


图10 试验3结果

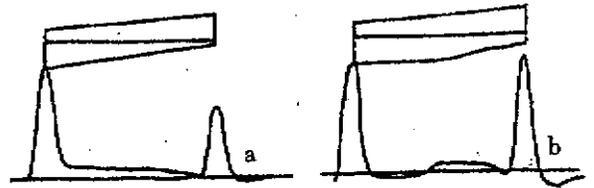


图11 PIT 试验曲线示意

3.4 模型桩试验

3.4.1 试验1

图 12a 为中山七路某工地 75 号桩头测点位置图。该桩为人工挖孔桩,砼设计等级为 C35,桩径 $\phi 1200$ mm,桩长 19.27 m。1 号点斜面与水平线夹角 25° ,2 号点斜面与水平线夹角 32° ,均倾向东,3 号点位于水平面上。

图 12b 为 1 号点记录的实测曲线,曲线特征:测试结果起跳后在零线下,出现明显的平直缓下跌线段,直到桩底处归零,桩底反射不明显。

图 12c 为 2 号点实测曲线。曲线特征:测试结果起跳后在零线以下,出现明显的平直,缓慢下跌线段,直到桩底归零,下跌幅度比 1 号点大。桩底反射不明显。

图 12d 为 3 号点(桩顶面水平)实测曲线。曲线特征:起跳后在零线以下出现微小平段,并且桩底反射特征明显。

3.4.2 试验2

图 13a 为某工地 144 号桩测点位置。该桩为人工挖孔桩,砼设计等级 C30,桩径 $\phi 1600$ mm,桩长 16.9 m。1 号点倾向东南,斜面与水平线夹角 34° ,2 号点倾向东南,斜面与水平线夹角 12° ,3 号点位于水平面上。

图 13b 为该桩水平点实测曲线。曲线特征:起跳后在零线下,出现微小的平直线段,桩底反射较明显。图 13c 为 2 号点实测曲线,曲线起跳后在零线以下,出现明显的平直缓下跌线段,直到桩底归零,桩

底反射不明显。

图 13d 为 1 号点实测曲线,曲线特征起跳后在零线下,出现波浪式的总体平缓下跌线段,直到桩底处归零,桩底反射不明显。

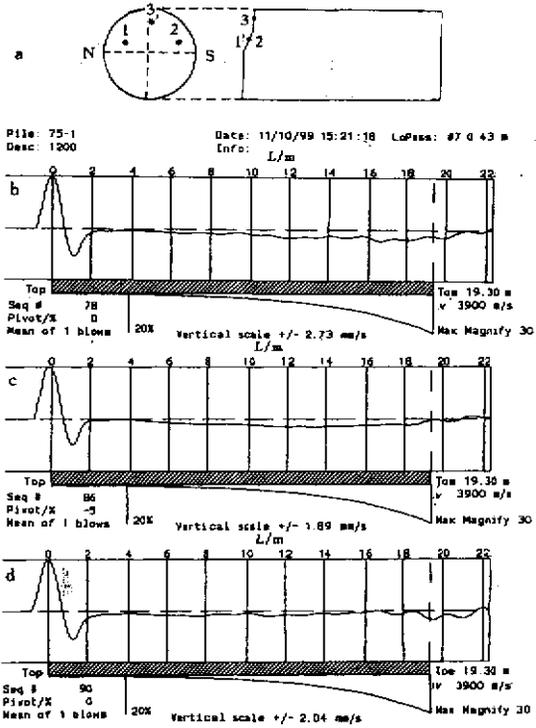


图 12 75 号桩头测点位置示意及实测曲线

a—测点位置;b—1 号点;c—2 号点;d—3 号点

3.4.3 试验 3

图 14 为广东工程勘察院江村基地 3 根模型桩平面、剖面与观测点布置图。1 号桩为垂直桩,2 号桩向西倾约 10°,3 号桩向东倾约 7°。图 15 分别为 1

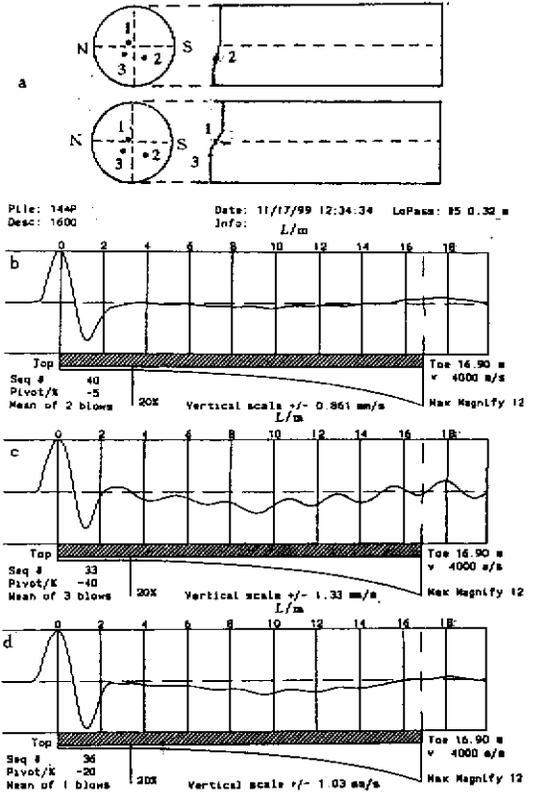


图 13 144 号桩头测点位置及实测曲线

a—测点位置;b—水平点曲线;c—2 号点曲线;d—1 号点曲线

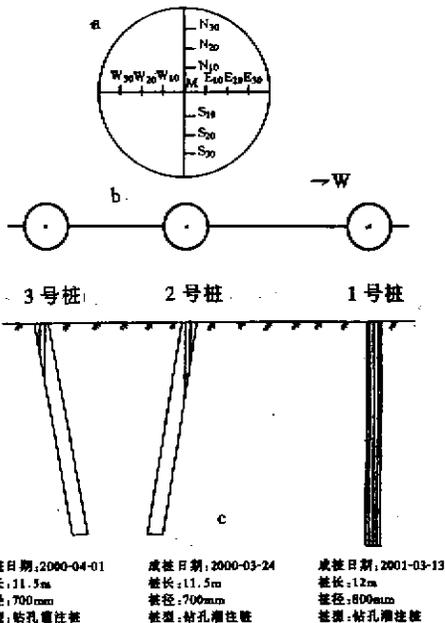


图 14 江村基地 3 根模型桩平面、剖面与观测点布置

a—观测点分布;b—模型桩平面分布;c—桩剖面

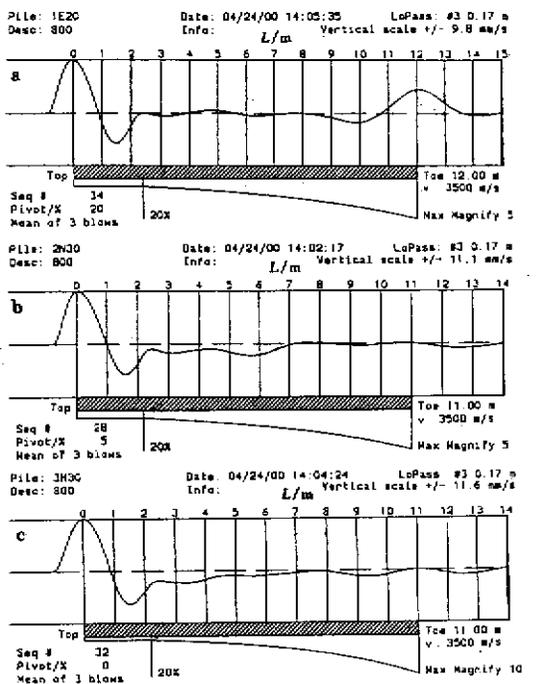


图 15 江村基地 3 根模型桩实测曲线

a—1 号桩曲线;b—2 号桩曲线;c—3 号桩曲线

号桩、2号桩、3号桩实测曲线。1号垂直桩,起跳后在零线附近,出现微小的起伏,直至桩底,桩底反射明显。2号(倾斜桩),起跳后,在零线以下出现明显的“凹”型曲线段,延伸至7.5~8m后归零,桩底反射不明显。3号桩(倾斜桩),起跳后,在零线以下出现明显的下跌与缓慢上升的异常曲线,直到桩底归零,底反射不明显。

分析不同倾斜角度模型桩实测曲线可知,①桩倾斜越大,曲线在零线以下凹幅度越大(畸变越大);②垂直桩测试曲线桩底反射明显,而倾斜桩测试曲线桩底反射不明显;③倾斜桩曲线异常特征往往呈平直缓慢下跌(或上升)线段,而桩局部缺陷的异常特征,往往是呈脉冲型的,由此为区分倾斜桩与桩身局部缺陷提供了识别标志。

4 测试方法应用条件及现场要求

4.1 测试方法应用条件

桩身砼质量均无严重缺陷,桩长在测试有效范围内,应提供准确的有效桩长,要求做持力层测试的桩底没有沉渣。

4.2 现场测试要求

1. 桩头必须凿去浮浆,切除桩头外露钢筋,在离钢筋笼20cm处,按东、南、西、北、中5个方向各打出20cm×30cm测试小平面,要求各测试水平面用打磨机磨平(应用水平尺检查水平度)。要求各测试水平面之间高差基本一致,在条件允许时,可提前

10d,将桩头浮浆打掉并清洗干净后,用高标号C45以上水泥砂浆将桩头抹水平(加速凝剂)。

2. 拾震器应严格埋平、埋直、粘牢。
3. 震源方向应垂直于桩顶面,激震应干脆、利索。
4. 检测设备应采用高精度的检测仪进行测试。检测前应对仪器设备进行检查,性能正常才可使用。
5. 每个检测工地均应进行激振方式和接收条件的选择试验,确定最佳激振方式和接收条件。
6. 当随机干扰较大时,应采用信号增强方式,进行多次重复激振与接收。
7. 每一检测点均应进行2次以上重复测试。出现异常波形应在现场及时研究,排除影响测试的不良因素后再重复测试。重复测试后波形与原波形应具有相似性。
8. 原则上每个工地应采用统一增益,以便进行曲线间的对比。
9. 要求检测曲线归零。

5 工程检测应用实例

5.1 桩底持力层测试

图16为某灰岩区D7号桩4个方向检测曲线。该桩 $\phi 1300$ mm,桩长37.27m。曲线特征:4条曲线均在13m左右出现软反射异常,桩底部均呈现硬反射曲线特征。推断该桩13m左右有较明显缺陷,而桩底持力层好。后经钻探予以证实。

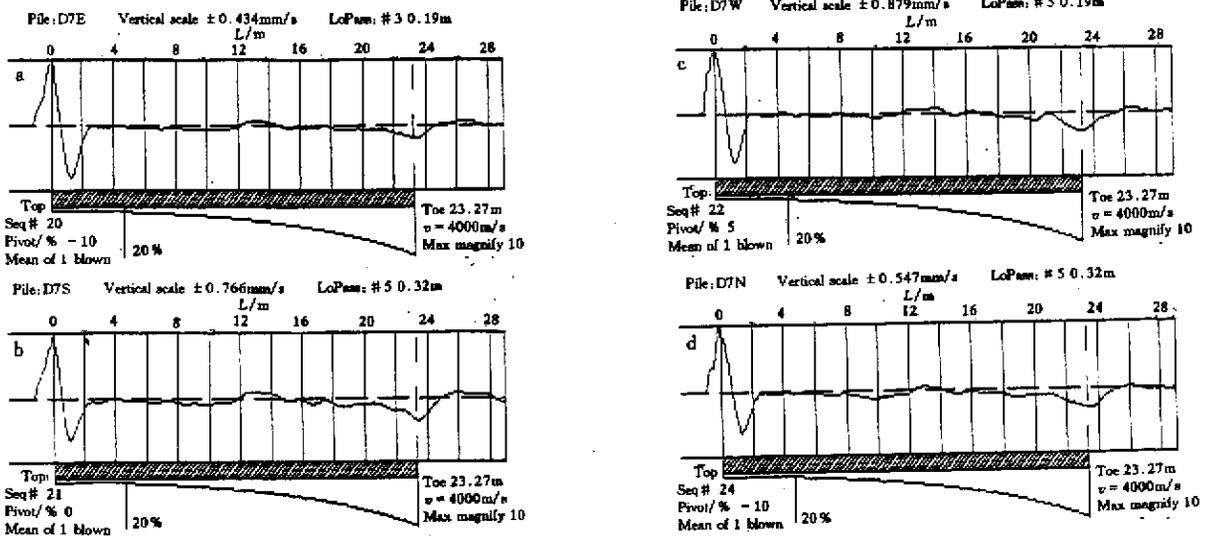


图 16 某灰岩区 D7 号桩各方向实测曲线

a—E 方向实测曲线 b—S 方向实测曲线 c—W 方向实测曲线 d—N 方向实测曲线

图 17 为某灰岩区 D13 号桩 4 个方向检测曲线。该桩 $\phi 1\ 300\ \text{mm}$ 桩长 23.36 m。曲线特征 桩

底有不同程度的强反射。经分析推断 ,N、W、E 方向持力层较差 ,S 方向持力层差 ,后经钻探证实。

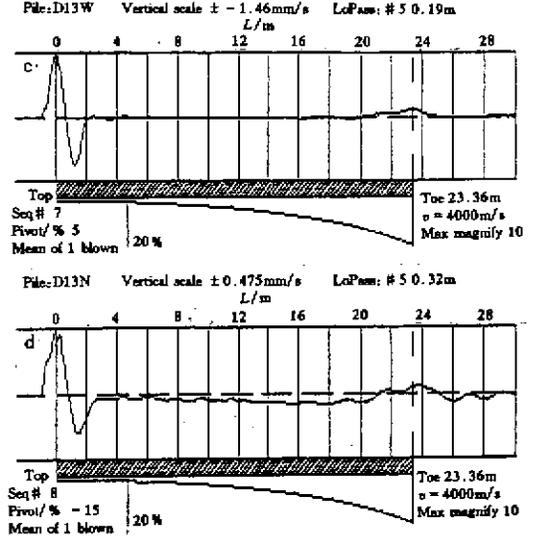
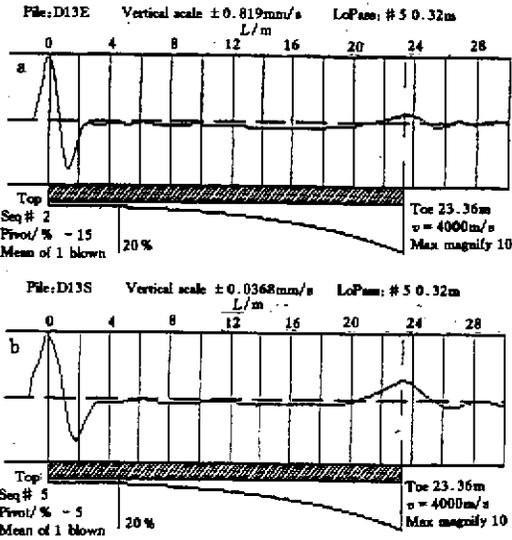


图 17 某灰岩区 D13 号桩各方向实测曲线

a—E 方向实测曲线 b—S 方向实测曲线 c—W 方向实测曲线 d—N 方向实测曲线

5.2 桩倾斜测试

图 18 为某工地 E3 号桩 4 个方向实测曲线。该桩 $\phi 1\ 300\ \text{mm}$ 桩长 37.45 m。曲线特征 :N、W 向曲线特征不明显 ,S、E 向曲线在 22 ~ 23 m 起 ,后段曲线呈明显的软反射异常特征。由此推断 ,该桩向 N、W 向倾斜 ,桩垂线与桩斜边线交点在 22 ~ 24 m。后经甲方验证为斜桩。

图 19 为某工地 H12 - 1 号桩 4 个方向实测曲线。该桩 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 桩长 43.15 m。曲线特征 :W 方向曲线起跳后 ,在零线下呈现平直水平线且到桩底部归零 ;S 方向曲线起跳后零线较平直 ;E、N 两方向曲线起跳后在零线下出现一段平直线段直到 10 m 处归零 ,一直到桩底。根据曲线特征 ,推断该桩略向西倾斜。后经甲方验证为斜桩。

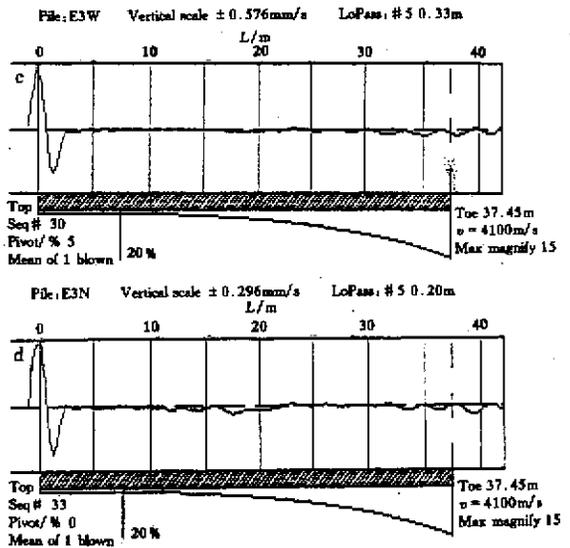
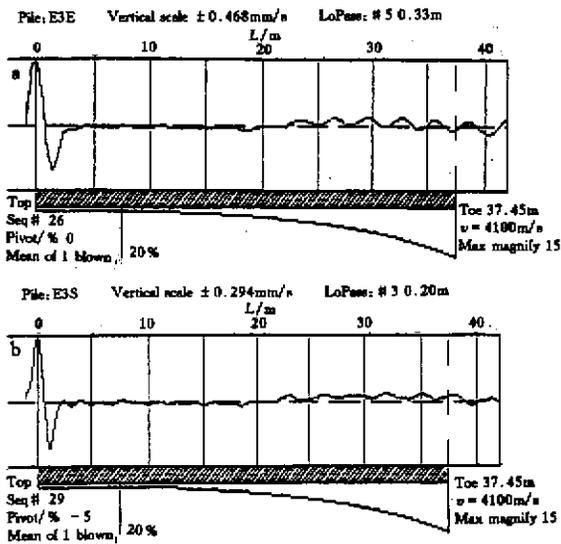


图 18 某工地 E3 号桩各方向实测曲线

万方数据 a—E 方向实测曲线 b—S 方向实测曲线 c—W 方向实测曲线 d—N 方向实测曲线

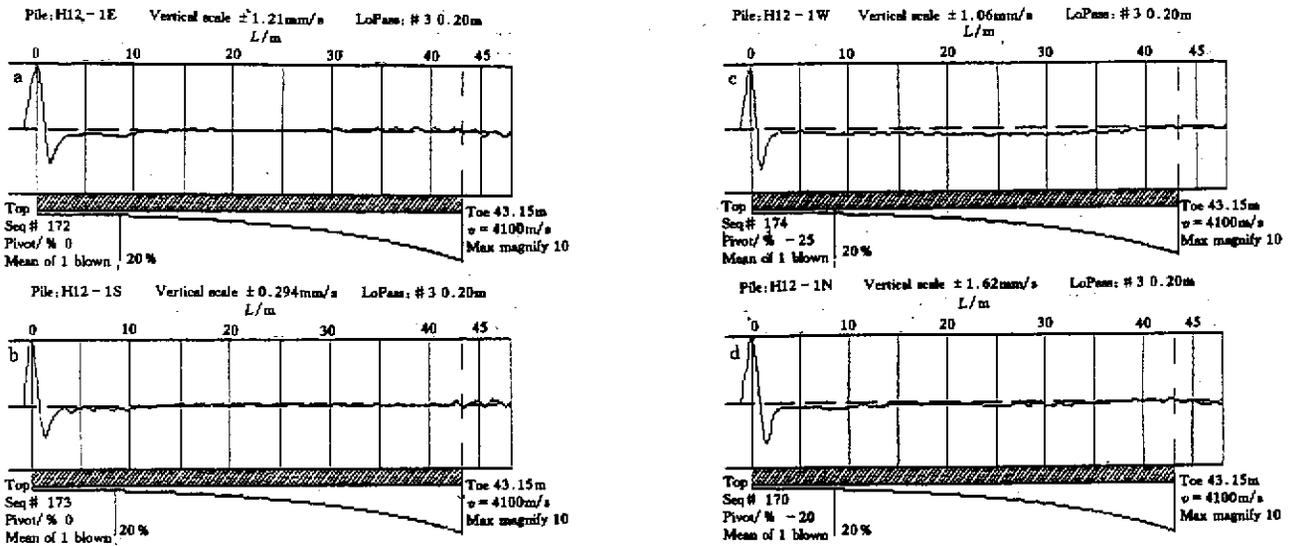


图 19 某工地 H12-1 号桩各方向实测曲线
a—E 方向实测曲线 ; b—S 方向实测曲线 ; c—W 方向实测曲线 ; d—N 方向实测曲线 ;

6 分析与展望

桩基低应变反射波法检测理论与方法,是由浅震勘探理论基础发展起来的一门综合性的新兴学科。动力试桩方法在我国应用于工程实践不久,对于桩身倾斜度测试方法技术研究,目前仍处于科研与实践阶段。由于桩身与桩周土共同作用机理具有一定的复杂性,因此,在桩身倾斜度判定上,还缺乏大量的实验对比资料,在仪器与测试方法技术上还有待进一步提高。因此,希望本文可以起到抛砖引玉的作用,使我国的桩基检测工作能向更深入,更高层次上发展。

本文承蒙中国地质调查局、国家‘基桩低应变动

力检测规程’主编王振东教授、国土资源部声学专家吴庆曾教授及浙江省地球物理勘探研究所总工赵竹占教授、广东地质矿产勘查开发局陈易玖教授级高工、武汉岩海公司王雪峰博士等专家审核与指导,并提出了宝贵的意见与建议,在此一并致谢。

参考文献 :

- [1] 陈仲候,傅唯一.浅层地震勘探[M].成都:成都地质学院,1984.
- [2] 徐攸在,刘兴录.桩的动测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [3] 王振东,周光龙,蒋泽汉,等.基桩低应变动力检测规程[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.

A STUDY OF TEST TECHNIQUES FOR PILE BOTTOM FORCE – BEARING LAYER AND PILE BODY DECLIVITY

DENG Yie-can ,LI Yi-zhen ,LU Chuan-heng ,HUANG Han-ping
(Guangdong Institute of Engineering Exploration , Guangzhou 510510 , China)

Abstract : This paper describes the principle and method for testing pile bottom force – bearing layer and pile body force – bearing declivity , deals with results of standard component test and inclined model pile test under the condition of inclination , and also gives some practical examples of engineering application.

Key words : force – bearing layer ; declivity ; reflection wave ; diffraction wave.

作者简介:邓业灿(1952-)男,现任广东省工程勘察院副院长,高级工程师,中国地质学会桩基无损检测专业委员会副主任委员。主要从事工程物探和基桩检测专业技术工作。