

基桩低应变反射波法典型时域信号识别技术研究

侯玉宾¹, 张帆¹, 刘大伟¹, 贺睿²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京先科岩土工程检测有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要 结合基桩完整性 PIT 现场对比试验, 对低应变反射波法现场测试和室内分析出现的典型疑难检测信号进行了分析研究. 结果表明, 传感器粘贴好坏、盲区内浅部缺陷的存在及深度变化、长桩段扩颈桩的存在、桩周土层软硬夹层的组合特性及嵌岩桩桩底岩土特性变化等在低应变反射波法检测曲线上均具有典型的反射信号, 正确认识这些反射信号的特征, 可以保证低应变反射波法具有较好的基桩完整性检测效果.

关键词 反射波法; PIT; 典型信号; 基桩完整性; 识别技术

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2007)04-0413-05

桩基是基础工程中最重要基础形式之一. 在桩身完整性检测方法中, 低应变反射波法应用最为普遍^[1-2], 也是国家行业标准首推的方法^[3-4]. 该法通过桩顶受到的瞬态力激振时的响应的测量来评价桩身机构的完整性, 主要利用反射信号相位与幅值特性及波传播速度参数判定桩身缺陷程度及缺陷位置. 但在实际应用中, 该法具有一定的局限性^[5]. 由于反射信号的影响因素多变, 该法的使用效果主要取决于测试分析人员对岩土工程、施工工艺的理解和波形测试实践与分析经验. 为了提高该法的实际应用效果, 本文根据检测实践和现场试验结果, 对低应变反射波法检测中经常出现的典型时域信号进行了分析研究.

1 基本理论

低应变反射波法以一维弹性杆平面应力波动理论为基础, 将桩身假定为一维弹性杆件, 在桩顶锤击激发一应力波, 该波沿桩身向下传播, 当桩身存在明显的波阻抗 Z 变化界面时, 就会产生反射波, 反射波的相位和幅值大小由波阻抗 Z 决定^[6]. 安装在桩顶的传感器可以接收来自桩身各个波阻抗变化界面处的反射信息. 根据这些信息, 可对桩身完整性进行分析判断^[7].

设桩身阻抗为 Z , 截面积为 A , 桩身材料密度为 ρ , 桩身波速为 C , 则桩身波阻抗为 $Z = \rho CA$. 桩身中任一界面上下两侧波阻抗分别为 $Z_1 = \rho_1 C_1 A_1$, $Z_2 = \rho_2 C_2 A_2$. 当 $Z_2 = Z_1$ 时, 表明截面均匀; 当 $Z_2 < Z_1$ 时, 表示相应位置存在缺陷, 反射波相位与入射波相位一致; 当 $Z_2 > Z_1$ 时, 表示相应位置截面增大, 反射波相位与入射波相位相反. 若存在缺陷反射波, 则可根据缺陷反射波到达时间 Δt 和桩身波速 C 推算缺陷位置. 缺陷距桩顶距离为 $L_x = \Delta t C / 2$.

2 传感器粘贴效果识别

从理论上讲, 传感器越轻且越贴近桩顶面, 测试信号也越接近桩面质点振动, 测试效果越好^[6].

目前, 传感器安装普遍采用粘贴方式. 橡皮泥具有柔性大、污染小、衰减小、价格便宜等优点, 将橡皮泥用作传感器的黏合剂一般可取得较好的检测信号. 如果在桩顶面处理不平整、桩顶面未清洗干净或寒冷季节时使用, 常会出现传感器虚黏现象, 导致检测信号失真, 影响检测信号的判识效果. 因此, 将橡皮泥用作黏合剂, 当出现首波明显加宽、信号波浪式振荡等异常现象时, 应首先考虑到传感器存在黏合不良因素的影响, 并重新黏结传感器后进行重复检测. 图 1 为同一根桩传感器虚黏和黏合牢固时的对比检测曲线. 由图 1 可以看出, 传感器黏合牢固, 波形规则, 桩底反射信号清晰; 传感器黏合不良可导致首波变宽, 信号震荡明显加大, 桩底反射信号无或不明显, 大大降低检测信号的判读效果.

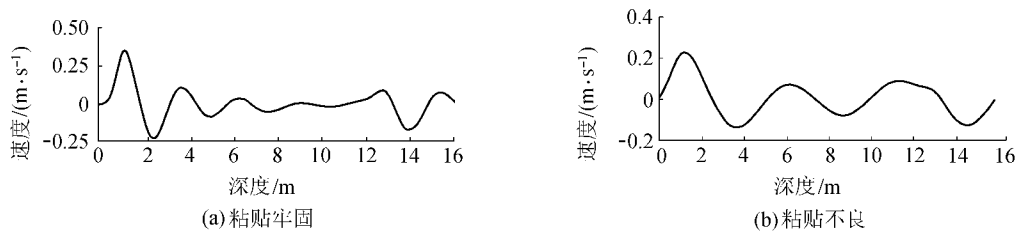


图 1 传感器粘贴效果对比曲线
Fig.1 Comparison of different fixing effects of sensors

3 测试盲区内缺陷识别

桩身浅部缺陷是桩基工程中最常见的缺陷.从桩身轴力传递特性可知,该类缺陷位置浅,在工作荷载下最易发生材料破坏,并且对工程质量危害最大.同时,浅部缺陷易造成波形畸变,并且这种畸变很容易使桩身其他部位产生缺陷屏蔽.

桩顶至桩顶以下 2 m 左右深度范围称为测试盲区,而盲区内的桩身缺陷一般称为浅部缺陷.桩顶应力波传播复杂,信号干扰大,由于激振脉冲有一定的宽度,如盲区内存在缺陷,则在脉冲宽度内,应力波遇到缺陷产生的上行反射波信号时将与能量较大的入射波重叠在一起,这会给桩身浅部缺陷信号的判别增加难度.

尽管测试盲区内的桩身缺陷判别难度较大,但并不是无法判断.因为该类缺陷发生频率高,位置浅,易于通过开挖方式予以验证,所以可以通过不断的对比测试和开挖验证找出该类缺陷在曲线上的特征和变化规律,以指导该类缺陷的识别.实践表明,根据以下特征对桩身浅部缺陷特别是严重缺陷进行判别效果较好.

完整桩波形衰减规则,无缺陷反射波存在,桩底反射信号清晰(图 2(a)).如波形特征表现为有较宽的入射脉冲或首波为非半正弦波或呈明显不对称半正弦波,波形在整体上呈现低频大振幅衰减振动,波形振荡延续时间长(图 2(b)),首波后反冲异常增大(图 2(c)),反冲后曲线明显在零线以上较长时间不归零或质点振动幅值异常增大(图 2(d))均指示有浅部断桩或其他类型的严重浅部缺陷存在.一般来说,缺陷越严重,缺陷位置越浅,曲线异常特征越明显.此外,浅部位的全断面缺陷还常伴有敲击声音异常或明显的桩顶和桩周土震动感等.

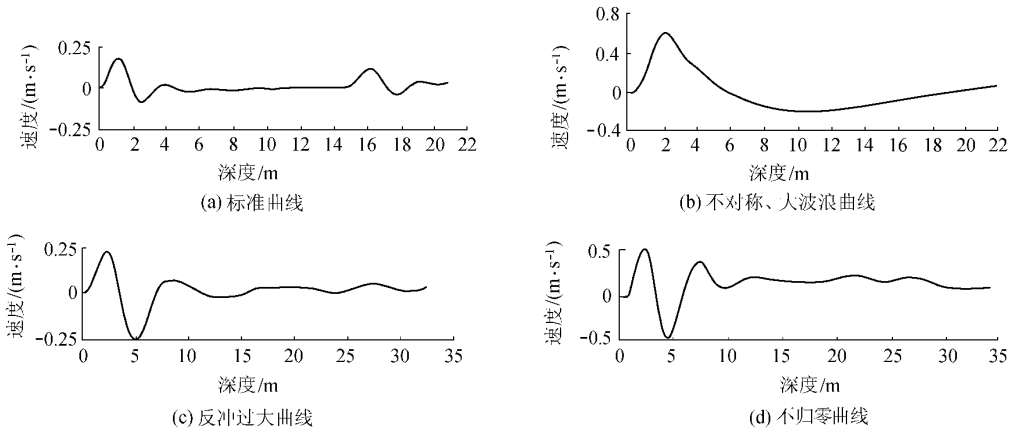


图 2 浅部缺陷现场试验曲线
Fig.2 Curves of field test on shallow defects of piles

因为当敲击桩头产生的脉冲较宽时,直达信号常常会掩盖桩顶附近的缺陷反射信号,所以可以利用灵敏度高、阻尼比恰当、高频性能好的传感器来提高桩身浅部缺陷的分辨率.但现场检测时,一般通过增加锤头的硬度、减小锤体尺寸及质量以及在桩顶选择坚硬点激发等措施来增加激振信号的高频成分,这可以有效提高盲区内缺陷的识别精度.例如,使用能激发出较低频率脉冲的大质量木棒敲击桩顶时难以精确辨识出的浅部缺陷,在较高频率脉冲的脆性尼龙锤敲击下可以清晰地显示出来(图 3).

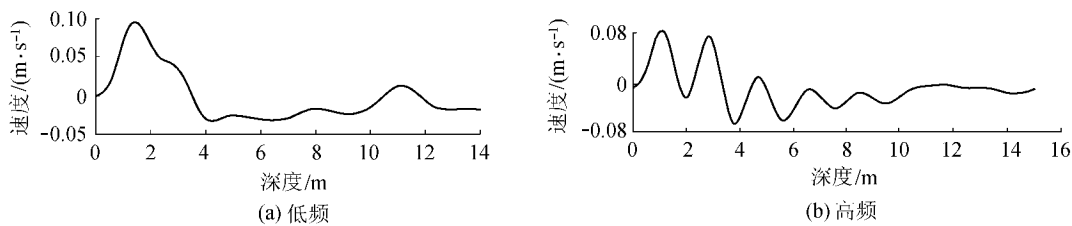


图 3 激发频率高低对比试验曲线

Fig.3 Comparison of test curves at high and low exciting frequencies

4 长桩段扩颈桩信号识别

检测实践表明,桩身扩颈不会对基桩的正常使用产生不利影响.因此,检测分析中一般不将扩颈看做是桩身缺陷.从桩身应力波反射规律可知,桩身扩颈引起的桩身反射信号与缺陷反射信号具有相反的相位特征.正常情况下,桩身的扩颈信号与缺陷信号极易辨别.一般来说,扩颈在检测曲线上表现为单一的负向反射信号.如果桩身某处扩颈段扩颈明显且长度较大,扩颈段开始处反相扩颈信号明显,那么扩颈段结束处也会因桩身截面恢复到正常截面出现明显的正向反射信号.仅从反射相位来分析,此反射信号与正常的桩身缺陷信号难以区别,此时应将检测信号与桩底反射特征、土层分布和基桩施工情况结合起来进行综合判定,否则可能造成严重误判.图 4 为一般扩颈与长桩段扩颈对比曲线.

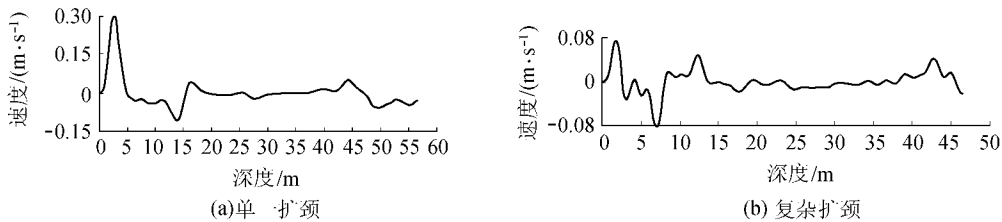


图 4 单一扩颈与复杂扩颈对比曲线

Fig.4 Comparison of curves for single and complex bulbs

由图 4(a)可以看出,该桩桩顶以下 11 m 左右处的单一扩颈表现为同一深度处一明显的单一负向反射信号,桩底反射信号清晰.

由图 4(b)可以看出,该桩桩顶以下 5.2 m 处出现非常明显的负向信号,表明该深度处桩身出现非常明显的扩颈现象,但 10.8 m 处又出现一非常明显的正向反射信号,表明该深度处截面缩小非常明显,似乎存在严重的桩身缺陷现象.综合分析检测曲线、施工记录和土层分布特征后发现,5.0 ~ 11.0 m 范围内出现流砂层.该桩设计桩径为 800 mm,在 5.0 ~ 11.0 m 深度范围内混凝土灌注理论方量应为 15.1 m³,但施工中实际灌注方量为 32.6 m³,出现严重的超灌现象.据此计算,该范围内实际桩径超过 1600 mm,即该扩颈段桩身阻抗为设计桩身阻抗的 4 倍以上.因此,10.8 m 处的正向反射信号即为该扩颈段结束处的正常反射信号.考虑到该桩桩底反射较明显,将该桩判定为完整桩,从而避免了桩身质量的严重误判.为慎重起见,在该桩桩顶至桩顶以下 13.0 m 的范围内进行了取芯验证,并利用取芯孔进行了声波透射法检测.检测结果表明,10.8 m 左右处无桩身缺陷.

5 桩周土阻力对波形的影响

由于桩周土对桩身中应力波的阻尼作用,桩身应力波所到之处均激发出能引起桩身质点反向振动的土阻力波,应力波发生指数衰减.浅部桩周土阻力引起的上行压力波还可导致首波后出现宽缓的负向反冲信号^[8].

由于桩周土阻力会导致应力波衰减,利用幅值进行缺陷定量分析的误差会增大,有效测试深度会减小,同时桩身正常反射信号的接收会受到干扰,应力波衰减严重时可导致桩身质量的误判.

检测实践表明,土层性质对桩中波传播特性的影响很大,且不同的土层状况对波形有不同的影响.较坚硬土层中存在软弱土层夹层时,波形曲线在软弱土层位置会出现同向的反射信号,容易得出缺陷的错误结

论 软弱土层中存在坚硬土层夹层时,波形曲线在坚硬土层位置会出现反向反射信号,容易得出扩颈的错误结论^[8].

图 5(a)为接桩位置在桩顶以下 11 m 处的桩的检测曲线.该桩桩底反射信号明显,桩顶以下 18 m 范围内以硬塑粉质黏土为主,地基承载力达 120 kPa,而在深度 15 m 左右处存在一厚度为 1.5 m 左右的有机质丰富的淤泥质土,地基承载力仅为 35 kPa,因此该桩桩顶以下 14.7 m 左右处出现的明显的正向反射应是软弱土层所致,而非桩身缺陷反射.

图 5(b)对应的桩在施工深度范围内土层总体以淤泥质软土为主,但钻孔资料显示该处桩顶以下 12~14 m 处存在一较硬的含砾砂层,该层土地基承载力是上下土层承载力的 5 倍多.由于 PHC 管桩不可能存在阻抗明显增大段,该桩桩顶以下 13 m 左右处出现明显的负向反射一定是软弱土层中的较坚硬土层造成的.

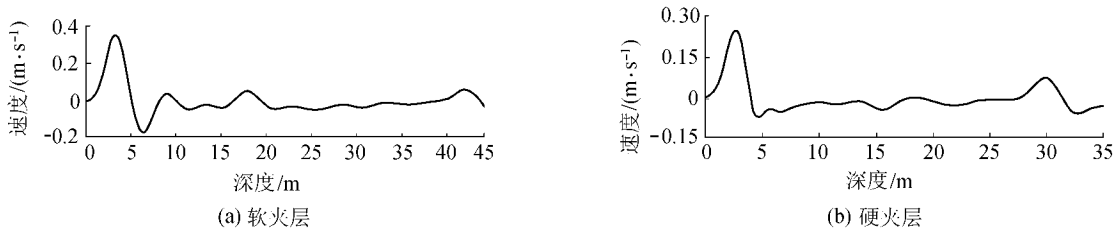


图 5 软硬土层夹层对波形的影响对比

Fig.5 Comparison of curves for soft and hard soil strata

6 嵌岩桩桩底反射识别

嵌岩桩是指桩端嵌入基岩一定深度的大直径灌注桩,它主要应用于特大桥、高层建筑、重型厂房等建筑物基础,在基岩埋藏深度较小的其他建筑物中也有大量应用.由于嵌岩桩桩底持力层为基岩,基岩特性、风化状况及桩底沉渣情况不同,嵌岩桩桩底反射与摩擦桩桩底反射常常具有更为复杂的信号特征.

a. 无桩底反射.由应力波传播原理可知,当桩底岩石的波阻抗与桩身混凝土的波阻抗相差不大时,即使桩较短,桩底反射也难以辨认^[3].图 6(a)为南京某工程轻微嵌入微风化砂岩的人工挖孔桩检测曲线.由于桩底岩石坚硬,桩底无沉渣存在,该检测曲线桩底反射不明显.

b. 同向型反射.当桩底为强度较低的砂页岩或强风化岩石,或嵌岩深度小或未入岩,或桩底沉渣较厚时,桩底岩土层波阻抗可能明显小于桩身混凝土的波阻抗,此时桩底反射类似于摩擦型桩的桩底反射,比较明显的同向桩底反射一般都可以分辨出来.图 6(b)为南京某职业学校轻微进入强风化砂岩的人工挖孔桩检测曲线.由于桩底岩石强度较低,该检测曲线出现了明显的同向桩底反射.

c. 反向型反射.大多数情况下嵌岩桩入岩深度为 1.5~3.0D(D 为桩径),当桩嵌入的岩层强度较混凝土高,或入岩深度较大,桩端嵌岩部分与基岩构成一体(此时相当于桩的截面积变大,波阻抗突然增大)时,检测曲线会出现与入射波方向相反的桩底反射,如图 6(c)所示.

d. 先负后正型反射.当入岩深度较大时,桩身应力波在基岩面会发生反向反射,同时透射波沿嵌入岩层中的桩身混凝土继续向下传播.若嵌入的岩层相对较软或桩底沉渣较厚,则入岩段桩身与桩底岩土层间会产生同向的桩底反射.图 6(d)为南京某桥梁嵌入高强度流纹岩的钻孔桩检测曲线.从该曲线可以看出,该桩在 37 m 左右位置处入岩,反向反射明显.但该桩与其他桩不同的是,桩底出现明显的同向反射.分析结果表明,该同向反射源自该桩过厚的桩底沉渣.这一结论与其后进行的钻芯法检测结果一致.钻芯法检测发现,该桩桩底沉渣厚度超过 50 cm,大大超过设计要求.

7 结 语

本文根据基桩完整性 PIT 现场对比试验,给出了低应变反射波法检测技术中常见的几种典型检测时域信号曲线识别特征.检测实践表明,盲区内浅部缺陷和长桩段扩颈现象在检测曲线上均具有典型的反射信号特征,传感器粘贴质量、桩周土中软弱土层夹层或坚硬土层夹层的组合类型以及嵌岩桩桩底岩土特性等,在时域检测曲线上均会出现相应的反射信号.因此,只有正确认识这些反射信号的特征,才能保证基桩低应变反射波法的检测效果.

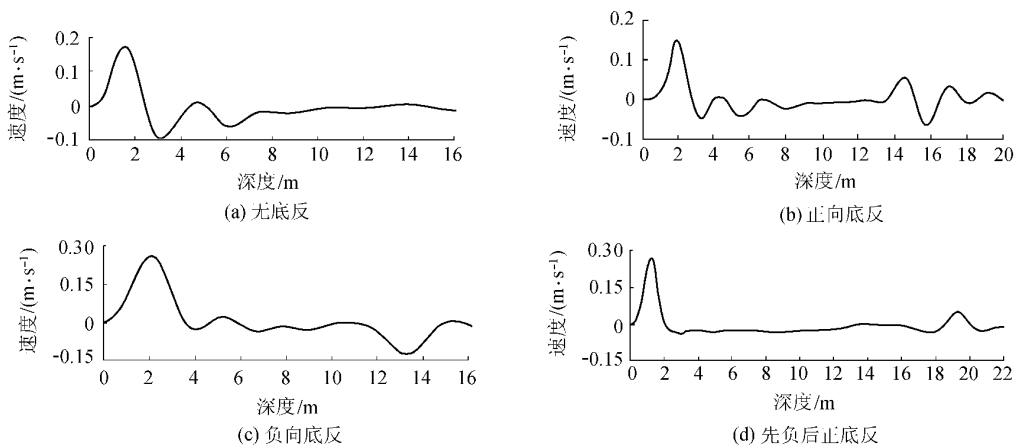


图 6 嵌岩桩桩底反射曲线对比
Fig.6 Comparison of reflection curves at toe of embedded pile

参考文献：

[1] 张献民,李少波.应用低应变能量分析确定基桩缺陷程度[J].岩石力学与工程学报,2005,25(增刊1):3198-3205.
[2] 林建生.桩基无损质量检测中瞬态锤击法时域曲线的分析与研究[J].地震地磁观测与研究,1993,14(3):5-11.
[3] 中华人民共和国行业标准编写组.JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
[4] 邢心魁,吴敏哲,谢异同.土对桩中波传播特性影响及小波分析研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2531-2536.
[5] 徐卫权.浅谈应力波反射法基桩检测的方法局限性[J].湖北地矿,2002,16(3):60-64.
[6] 罗骥先.桩基工程检测手册[K].2版.北京:人民交通出版社,2004.
[7] 王辉鹏.反射波法在基桩完整性检测中的应用[J].工业建筑,2006,36(增刊):817-819.
[8] 卞国炎,张允平,瞿阳.PIT 仪测试桩基结构完整性的波形判读方法[J].合肥工业大学学报,2004,27(5):617-621.

Low-strain reflected wave method for identification
of typical time-domain signals of foundation piles

HOU Yu-bin¹, ZHANG Fan¹, LIU Da-wei¹, HE Rui²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Nanjing Xianke Geotechnical Test Limited Corp., Nanjing 210008, China)

Abstract :In combination with PIT field comparative tests on the integrity of foundation piles , a study was performed on typical doubt signals in field test and laboratory analysis with the low-strain reflected wave method. The result shows that typical reflected signals occur in the detection curve , which can reflect the fixing effect of sensors , the shallow defects and their depth variation in blind zone , the existence of bulbs in long section of piles , the combination characteristics of soft and hard soil strata in pile surrounding soil , and geotechnical characteristics at the toe of embedded piles. Therefore , correct identification of these reflected signals is helpful to obtain satisfactory result from integrity testing of foundation piles with the low-strain reflected wave method.

Key words :reflected wave method ; PIT ; typical signal ; integrity of foundation pile ; identification technique