

系梁对桩柱式基础反射波法检测影响的计算及现场试验^①

杨 宇^{1,2}, 马 晔^{1,2}

(1. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 2. 桥梁结构安全技术国家工程实验室, 北京 100088)

摘要:根据应力波按半球面波扩展传播的特点, 结合系梁(盖梁)、墩柱、桩基之间的几何尺寸关系, 建立系梁(盖梁)等结构件对应应力波干扰频率的计算方法并得到其分布特征。采用多通道同步采集设备结合同相轴分析方法进行桩柱式基础完整性状况跟踪测试现场试验。结果表明: 桩顶自由时得到的扩径、桩底反射等信号特征可以在墩柱、系梁等施工后测试得到的信号中体现; 拾振点应尽量竖向串列式排列, 这种拾振方式不仅可以根据拾振点起始波峰之间的时差和拾振点间距计算结构物的应力波波速, 而且不同拾振点的振动曲线能形成同相轴, 便于利用同相轴分析判断桩底、盖梁(系梁)反射和其他反射体的反射。数据分析时, 对异常信号应重点分析其拾取时刻, 并借助测定的墩柱、系梁或盖梁的应力波波速判断其发生位置。

关键词: 桩; 系梁; 应力波; 反射; 频率

中图分类号: TU473.1+6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0119-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0563

On the Calculation of Disturbance of a Tie Beam on a Column-pile Foundation in Tests Using Low Strain Reflected Wave Method and In-situ Verification Experiment

YANG Yu^{1,2}, MA Ye^{1,2}

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. National Engineering Laboratory for Safety Technology of Bridge Structure, Beijing 100088, China)

Abstract: Assuming that a stress wave in low strain tests spreads in semi-spherical mode, a method was established to calculate the disturbance of a tie beam in response to the frequency of the stress wave. This method is related to the geometry of the tie beam, bent cap, pier, and pile. Furthermore, a test method was designed to test the integrity of piles in a column-pile system, in which multi-channel equipment was required to record the behavior of the bent cap and pile. Tests were conducted to compare the integrity of the pile during the entire column-pile system procedure. The results showed that when pile top was free, the reflection signal could be detected after tie beam and pier were constructed. Sensors should be located vertically as a linear array that will facilitate the calculation of the stress velocity and allow the recording of the behavior of the reflection from the bent cap, pile toe, etc. In regard to abnormal signals, their peak time should be analyzed to determine their location according to the stress velocity of pier, tie beam, and bent cap. It is not recommended that the abnormal signals be analyzed using only the similar or opposite-phase method as has been the previous rule in pile integrity test when pile top was free.

① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2011-318-223-1390); 交通运输部建设科技项目(2007-318-223-30); 交通运输部行业重点实验室应用基础研究计划项目(2012-319-223-020)

作者简介: 杨 宇(1976-), 男, 副研究员、博士, 主要从事桥梁基础工程试验检测研究. E-mail: 402051135@qq.com

Key words: pile; tie beam; stress wave; reflection; frequency

0 引言

对桩顶有结构物的基桩,目前多尝试采用桩帽或承台顶部激振,桩身侧壁拾振的方法进行完整性检测。马晔等^[1]进行了在盖梁顶面对应桩基中心位置激振的试验;刘建磊等^[2]尝试盖梁顶部、桩侧开槽、底系梁顶部等位置激振,桩基侧向和底系梁顶部等位置接收的方法;孙晓立等^[3]则在桩顶钻孔至系梁底部下方,将传感器安装于钻孔底部进行检测。

关于桩顶结构物的影响,柴华友等^[4-5]认为承台等边界对反射波有影响。邵帅^[6]则提出在桩帽和桩身外侧敲击时,次生反射将使上行波曲线在初始阶段出现不规则峰值;彭志豪^[7]认为桩顶梁体的尺寸以及桩的尺寸都会影响应力波的传播;季勇志^[8]认为固接的桩基,其纵波时域波形表现为紧接入射波峰之后有明显的反相波动;杨宇等^[9]提出,对于既有桩基,应力波符合平截面假定才能取得和桩顶自由时相一致的结果。

现有系梁等对应应力波干扰的分析研究成果尚不完善,本文拟通过理论分析和试验对此进行分析。

1 计算假定

本文采用如下计算假定:(1)激振锤 T 瞬态激励桩顶,锤击点产生半球面波^[10],并从锤击点向盖梁、墩柱等传播(图1)。(2)结构件内应力波的传播速度不受结构件外裹介质的影响^[10]。(3)结构物阻抗变化处,应力波产生反射、折射等,且满足 Snell 定律^[10]。

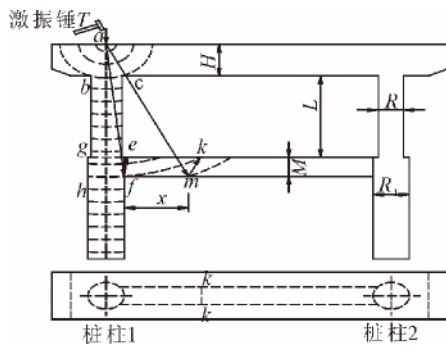


图1 激振引起的应力波

Fig.1 Propagation of stress wave caused by transient shock

2 盖梁顶部激振时系梁对应力波的影响

如图1,记盖梁高度为 H ,墩柱高度为 L ,系梁高度为 M ,墩柱半径为 R ,桩基半径为 R_1 , m 和 f 点

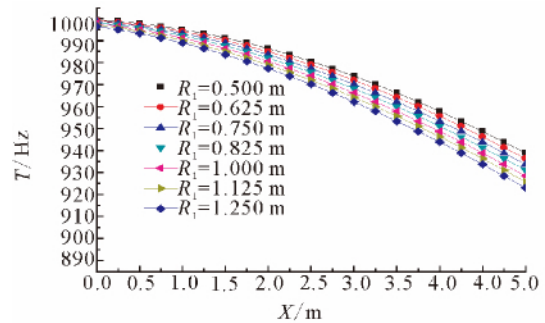
之间的距离为 X 。则入射波传播到系梁底部时的入射角 θ 为

$$\sin \theta = \frac{H + L + M}{\sqrt{(H + L + M)^2 + (R_1 + X)^2}} \quad (1)$$

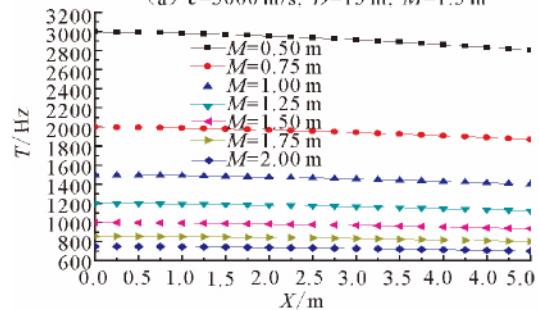
则反射波(如 ef, mk)在系梁内的行程 N 为

$$N = \frac{M}{\sin \theta} = \frac{M \sqrt{(H + L + M)^2 + (R_1 + X)^2}}{H + L + M} \quad (2)$$

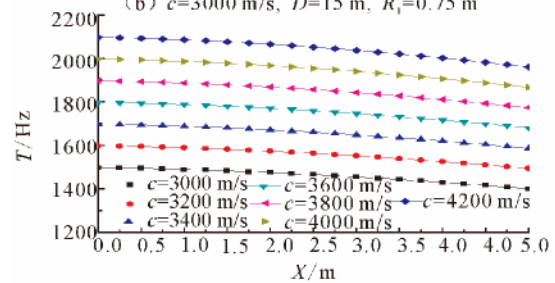
反射波在系梁内反射 2 次,即经历 2 个反射行程($2N$)后,形成一个反射周期。



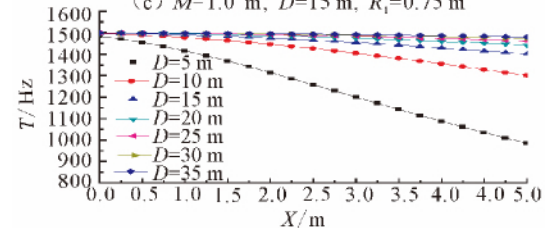
(a) $c=3000 \text{ m/s}, D=15 \text{ m}, M=1.5 \text{ m}$



(b) $c=3000 \text{ m/s}, D=15 \text{ m}, R_1=0.75 \text{ m}$



(c) $M=1.0 \text{ m}, D=15 \text{ m}, R_1=0.75 \text{ m}$



(d) $M=1.0 \text{ m}, c=3000 \text{ m/s}, R_1=0.75 \text{ m}$

图2 盖梁顶部激振各参数变化时 T 与 X 关系图

Fig.2 Relationship between T and X with various parameters under transient shock on the bent cap top

记混凝土波速为 c , 则反射频率计算 T 如下

$$T = \frac{c}{2N} = \frac{c(H+L+M)}{2M\sqrt{(H+L+M)^2 + (R_1+X)^2}} \quad (3)$$

记 $D=H+L+M$, 得 T 与 X 关系如图 2 所示。

由图 1, 反射波每反射一次向另一侧墩柱偏移的横向步距 ΔX 如式(4), ΔX 与 X 关系如图 3 所示。

$$\Delta X = \sqrt{N^2 - M^2} = \frac{M(R_1 + X)}{H + L + M} \quad (4)$$

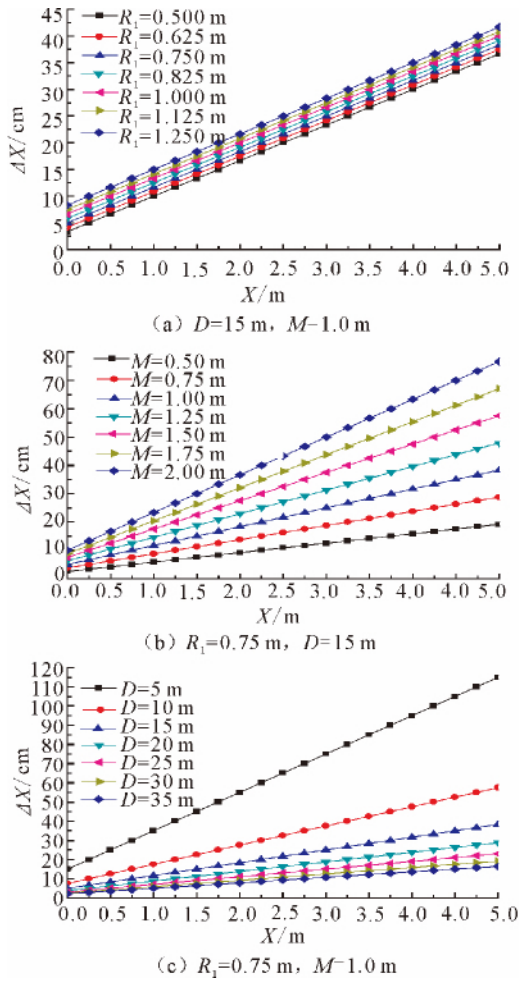


图 3 ΔX 与 X 关系图

Fig. 3 Relationship between ΔX and X

如图 2、图 3 所示, 反射波在系梁入射端的移动步距较小, 在系梁入射端多次反射, 且反射频率较高。

3 桩顶与系梁结合位置竖向激振的影响

如图 4, 系梁内反射波的行程 N 、反射频率 T 为

$$N = \sqrt{M^2 + (R_1 - R + X)^2} \quad (5)$$

$$T = \frac{c}{2N} = \frac{c}{2\sqrt{M^2 + (R_1 - R + X)^2}} \quad (6)$$

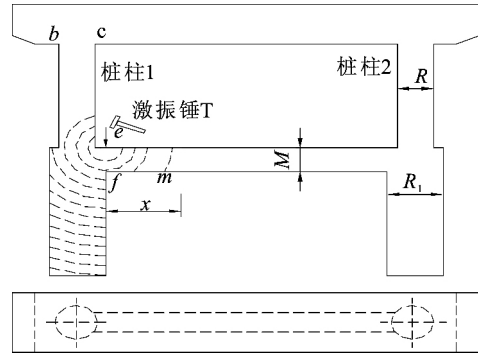


图 4 系梁顶部与桩体连接处竖向激振

Fig. 4 Vertical shock on the joint of pile and tie beam top

反射波向另一侧墩柱偏移的横向步距 ΔX 为:

$$\Delta X = R_1 - R + X \quad (7)$$

由式(7), 反射波在系梁入射端移动步距较小, 将在系梁入射端多次反射。 T 变化如图 5 所示, 可见反射波在系梁边缘反射频率较高。

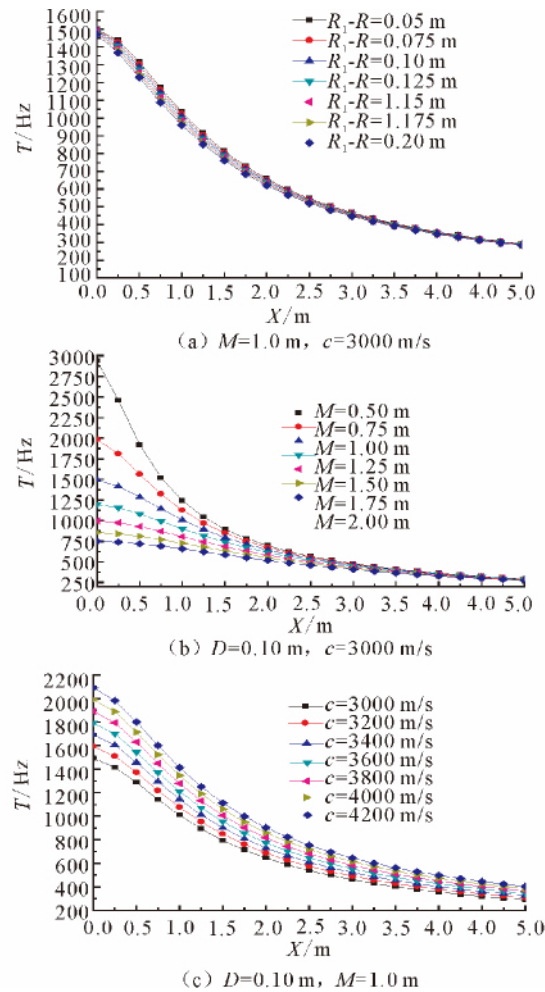


图 5 系梁顶部激振各参量变化时 T 与 X 关系图

Fig. 5 Relationship between T and X with various parameters under transient shock on the tie beam top

4 桩顶远离系梁位置竖向激振时的影响

如图6,系梁内反射波行程 N 、反射频率 T 为

$$N = \sqrt{M^2 + (2R_1 + X)^2} \quad (8)$$

$$T = c/2N = c/(2\sqrt{M^2 + (2R_1 + X)^2}) \quad (9)$$

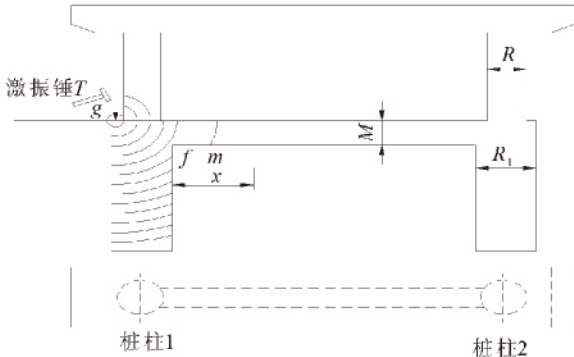


图6 桩柱式基础的桩体顶部竖向激振

Fig.6 Vertical shock on the pile top of column-pile foundation

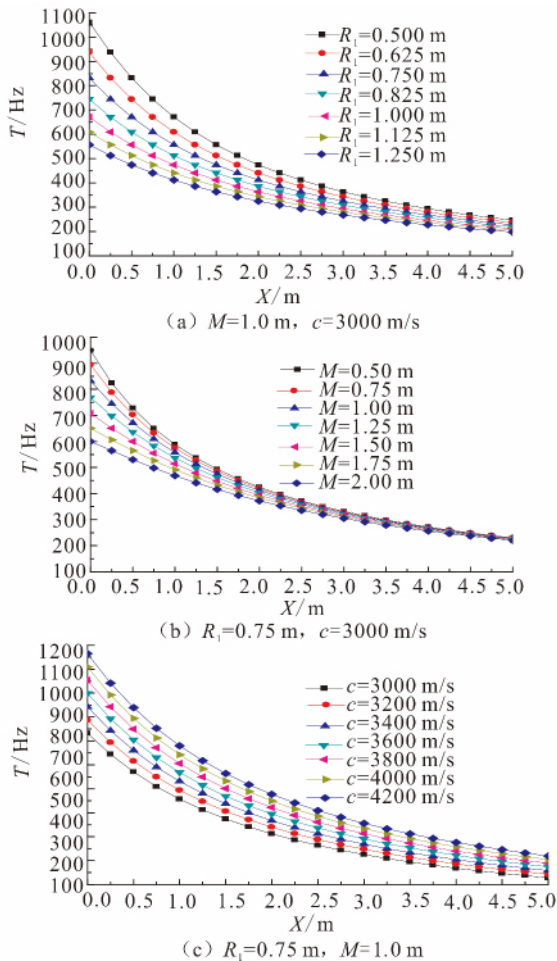


图7 桩顶远离系梁位置激振各参量变化时隔不久 T 与 X 关系图

Fig.7 Relationship between T and X with lations parameter s under transient shock on the pile top away from tie beam

反射波向另一侧墩柱偏移的横向步距 ΔX 为:

$$\Delta X = 2R_1 + X \quad (10)$$

T 的变化如图7所示。可见反射波在系梁边缘的反射频率较低。由式(10),反射波在系梁入射端的移动步距较大,对系梁和桩柱结合部的激励则没有前两种激振方式显著。

5 现场试验

5.1 试验用桩柱式基础概况

选取杭新景高速庙口张大桥左幅8#墩试验(图8)。自系梁顶面往下12.5m为粉质黏土;粉质黏土层下方为8.0m强风化粉砂岩;其下为中风化粉砂岩。

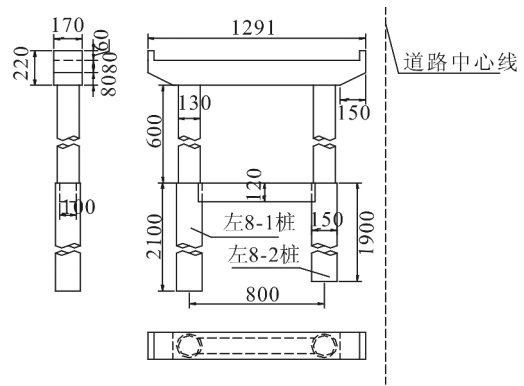


图8 左幅8#墩总体布置图(单位:cm)

Fig.8 Diagram of 8# pier in left section of Miaokouzhang bridge (unit: cm)

5.2 试验设备

激振采用环氧树脂力棒,重3.2kg。测试设备采用改进的RS-1616K型基桩动测仪^[9]。

5.3 施工期桩基完整性检测结果

采用反射波法测试,传感器安装在距桩中心1/2~2/3R(R为基桩半径)处,桩中心激振。测试时,系梁及系梁对应桩段未浇筑。测试信号如图9。

桩号:左8-1 桩径:左1500mm 强度等级:C25 波速:4250m/s

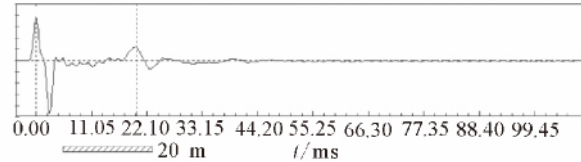


图9 左8-1基桩测试曲线

Fig.9 Testing curve of pile left 8-1

从图9可见,桩底反射信号特征明显。系梁下方约2.5m处存在明显的扩径信号,与施工记录中浅部施工时有扩孔行为一致。

5.4 梁波速测试结果

如图 10,系梁施工后、墩柱施工前,桩顶激振,左 8-1 桩顶及系梁中部同时拾振。拾振结果如图 11。

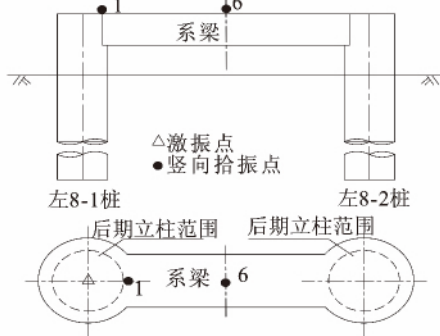
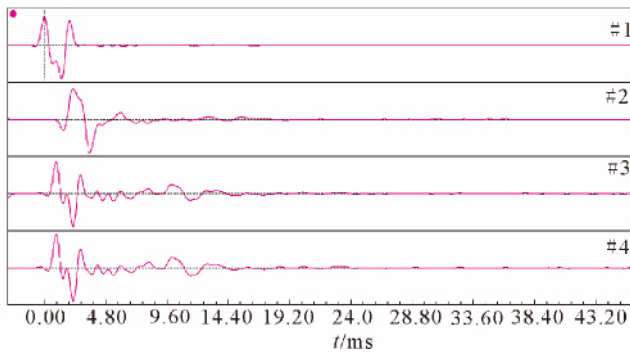


图 10 系梁施工后激振点、拾振点布置图

Fig. 10 Layout of the exciting points and receiving points



(注: #1:区域 1 拾振; #2:区域 6 拾振; 其余无效)

图 11 左 8-1 桩顶激振、系梁中部竖向拾振结果

Fig. 11 Testing curve of excitation on pile top and vertical vibration receiving on middle of tie beam of pile left 8-1

区域 1 和区域 6 拾振器首波波峰拾取时差为 2.26 ms,拾振器相距 4.00 m,则系梁内的波动传播速度为 $4.00 / (2.26 \times 10^{-3}) = 1740 \text{ m/s}$ 。区域 6 拾振器两波峰相邻时差 4.34 ms,对应的反射点距区域 6 拾振器 $\Delta_{12} = 1740 \times 4.34 \times 10^{-3} / 2 = 3.75 \text{ m}$

区域 6 拾振器位置距非激振端墩柱约 4.0 m,可以认为区域 6 拾振信号中除首波波峰外的另一个显著波峰为非激振端桩顶的反射信号。

5.4 盖梁施工完毕后完整性检测结果

5.4.1 盖梁顶部激振、桩顶和墩柱侧壁接收测试结果

如图 12,盖梁顶部激振,墩柱侧壁、桩顶各设置 2 个拾振点。墩柱侧壁传感器安装位置距离桩顶 1.5 m 和 3.0 m,测点方位同桩顶一个测点一致。

基桩扩径部分距区域 1 拾振器约 6.7 m,距区域 2 拾振器约 4.7 m,距区域 3 拾振器约 2.5 m。

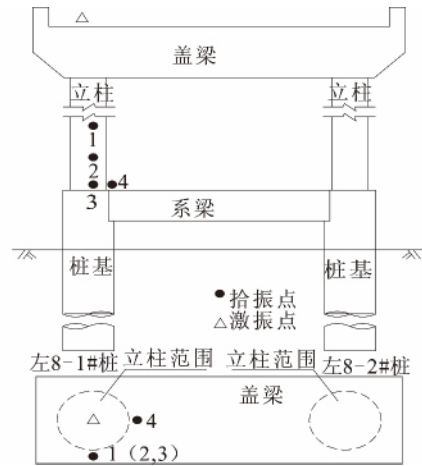
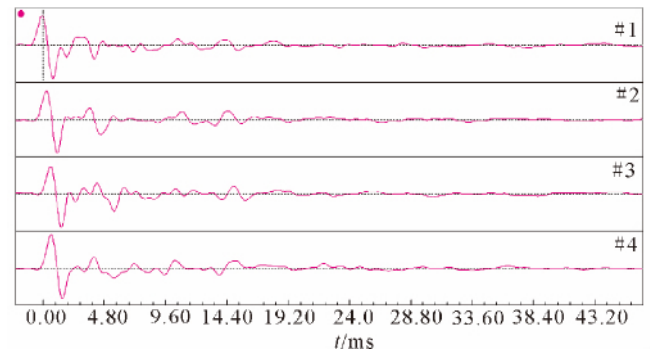


图 12 激振和拾振区域布置图

Fig. 12 Layout of excitation zone and vibration receiving zone

按式(3)计算得到系梁干扰频率在 800~900 Hz 之间,并按此滤波得测试信号曲线如图 13。



(注: #1:区域 1 拾振; #2:区域 2 拾振; #3:区域 3 拾振; #4:区域 4 拾振)

图 13 左 8-1 基桩测试曲线

Fig. 13 Testing curve of pile left 8-1

区域 1、区域 2 首波波峰时差 0.34 ms,拾振器相距 1.5 m,则墩柱内应力波速度约 $1.50 / (0.34 \times 10^{-3}) = 4411 \text{ m/s}$ 。可认为墩柱内应力波传播速度与基桩内应力波传播速度基本一致。

(1) 区域 1 拾振信号曲线分析

由图 13 提取的区域 1 拾振信号曲线如图 14 (a)。

①图 14(a)中,距起始波峰 3.23 m 处(软件标称距离,拾振时刻 1.39 ms)反射信号对应为系梁反射。

②距起始波峰 6.90 m(软件标称距离,拾振时刻 3.07 ms)反射信号应为基桩浅部对应的扩径部

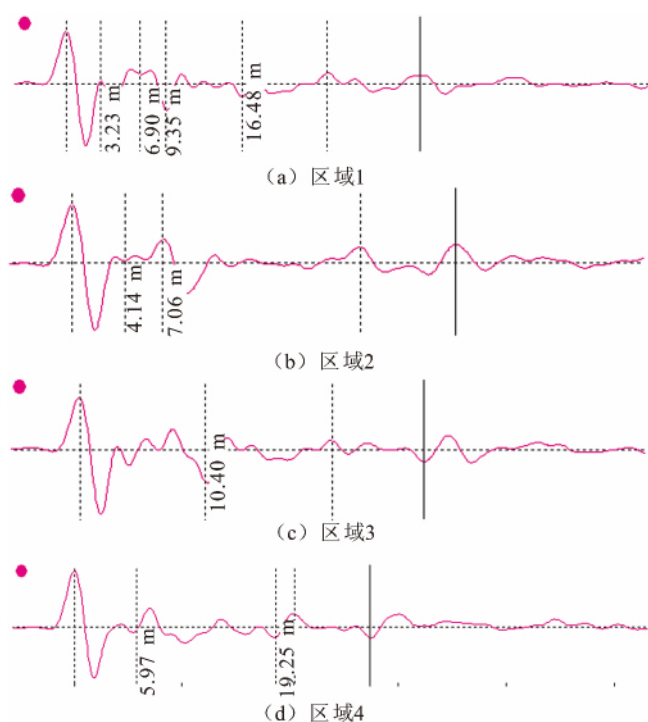


图 14 拾振信号曲线(由图 13 提取)

Fig. 14 Curves of vibration receiving signals
(Drawed from Fig. 13)

分的信号,与桩顶自由时测试结果略有差异。

③距起始波峰 9.35 m(软件标称距离,拾振时刻 3.07 ms)反射信号应为盖梁反射信号。应力波经系梁反射后向盖梁传播,在盖梁与墩柱界面再次反射激发传感器。应力波经系梁、盖梁反射至传感器的行波距离约 9.0 m,与软件标称距离相符。

④距起始波峰 16.48 m(软件标称距离,拾振时刻 7.10 ms)反射信号与③中软件标称距离为 9.42 m 的信号相差 7.13 m,应为③中信号传递至基桩扩径部分形成的再次反射信号。

⑤右侧无文字标注的虚线位置对应的基桩波速为 4 619 m/s,与桩顶自由时测试结果相当,应为桩底信号。

⑥右侧无文字标注的实线位置拾振时刻 13.91 ms,与桩底位置拾振时刻(10.81 ms)相差 3.99 ms。按波速 4 400 m/s 计算,二者相距 6.80 m。可认为此信号为桩底反射信号自区域 1 传递到盖梁然后反射至区域 1 引起的振动信号。

(2) 区域 2 拾振信号曲线分析

由图 13 提取区域 2 拾振信号曲线如图 14(b),并按上述方法分析如下:

①图 14(b)中,距起始波峰 4.14 m(软件标称距离,拾振时刻 1.92 ms)处反射信号为基桩扩径信

号。但软件标称距离与理论计算距离有偏差,应为不同测试时期波速差异导致。

②距起始波峰 7.06 m(软件标称距离,拾振时刻 3.41 ms)反射信号应为盖梁反射信号。应力波经系梁向盖梁反射再传至传感器的行波距离约 7.5 m,与软件标称距离接近。

③右侧无文字标注的虚线位置拾振时刻为 10.70 ms,对应的基桩波速为 4 204 m/s,与桩顶自由时测试结果相当,应为桩底信号。

④右侧无文字标注的实线位置拾振时刻为 13.51 ms,为桩底反射信号自区域 2 拾振器位置传递到盖梁然后反射至区域 2 引起的振动信号。

(3) 区域 3 拾振信号曲线分析

由图 13 提取区域 3 拾振曲线如图 14(c),分析如下:

①图 14(c)中桩顶(图中左侧无标注虚线)至桩底(图中右侧无标注虚线)与图 9 相似。但在软件标称距离 10.40 m 处,图 14(c)出现明显波峰。结合系梁施工后、墩柱施工前的测试结果,认为该信号为非激振端桩顶反射信号。

②右侧无文字标注的实线位置拾振时刻为 13.09 ms,与桩底位置拾振时刻(9.92 ms)相差 3.17 ms。此信号为桩底反射信号自区域 3 传递到盖梁然后反射至区域 3 拾振器引起的振动信号。

(4) 区域 4 拾振信号曲线分析

由图 13 提取区域 4 拾振信号曲线见图 14(d),并分析如下:

①图中桩顶(图中左侧无标注虚线)至桩底(图中右侧无标注虚线)与图 9 相似。

②图中软件标称距离为 5.97 m 的信号为盖梁反射信号。

③应力波在系梁内反射行程为 16.0 m,前期测到的系梁内应力波传播速度约 1 750 m/s,则应力波在系梁内传播时间为 $16.0/1\,750.0=9.1$ ms。而图 14(d)中软件标称距离为 19.25 m 信号的拾振时刻为 8.93ms,二者相符,故判断该信号为系梁反射信号。

5.4.3 桩顶激振、桩顶和墩柱侧壁接收测试结果

在基桩顶部激振,拾振点位置如图 15。其中拾振点布置同图 13。

(1) 区域 3 激振测试结果分析

区域 3 激振的拾振信号曲线见图 16。从图中可见,区域 1、区域 2 的拾振信号无规律。

由图 16 提取区域 3 拾振曲线如图 17(a)。

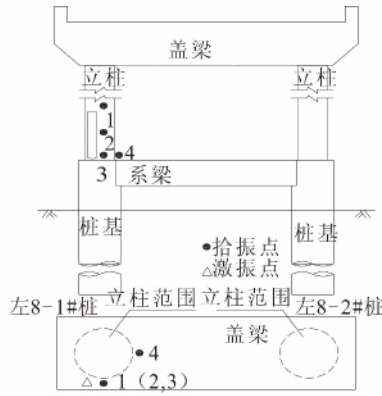
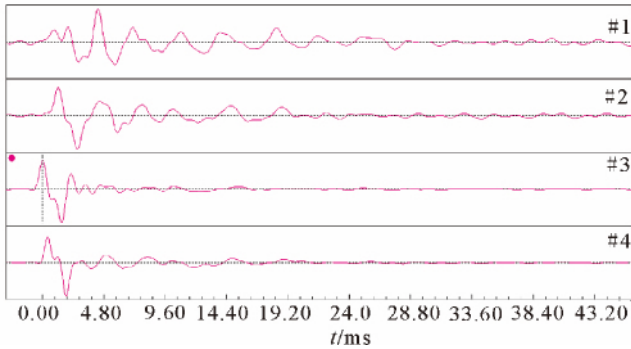


图 15 桩顶激振、桩顶与墩柱侧壁接收示意图

Fig. 15 Diagram of the excitation on pile top and the receiving by pile top and side wall of pier



注: #1:区域 1 拾振; #2:(区域 2 拾振; #3:区域 3 拾振; #4:区域 4 拾振)

图 16 左 8-1 桩顶激振、墩柱及桩顶拾振测试振荡结果(区域 3 激振)

Fig. 16 Testing curves of excitation on pile top and vibration receiving on pier and pile top of pile left 8-1 (Excitation in zone 3)

①距起始波峰 2.85 m(软件标称距离,拾振时刻为 1.44 ms)的反射信号为桩身扩径信号。

②由前述分析,应力波在系梁内传播时间为 9.1 ms。图 17(a)中标称距离为 19.43 m 信号的拾振时刻为 9.46 ms,二者相符,故该信号为系梁反射信号。

③图中右侧无文字标注的实线位置拾振时刻为 12.96 ms,与桩底位置拾振时刻(10.32 ms)相差 2.64 ms。按波速 4 400 m/s 计算,则二者标称距离相差 5.81 m。故可认为此信号为桩底反射信号自系梁底面位置传递到盖梁,然后反射至区域 3 拾振器位置引起的传感器振动信号。

由图 16 提取区域 4 拾振信号如图 17(b)。

①距起始波峰 2.65 m(软件标称距离,拾振时刻为 1.40 ms)反射信号为桩身扩径信号。

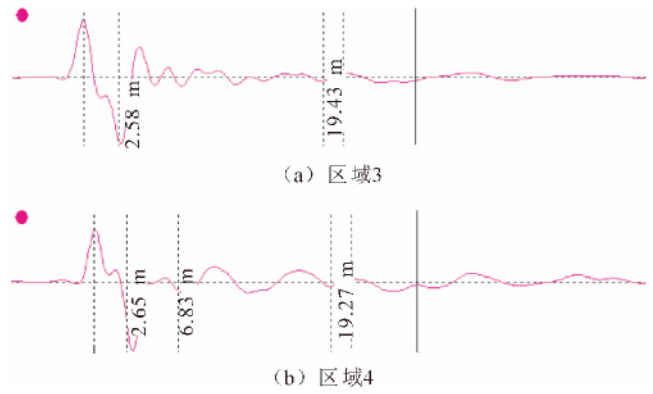


图 17 拾振信号曲线(由图 16 提取)

Fig. 17 Curves of vibration receiving signals (Drawn from Fig. 16)

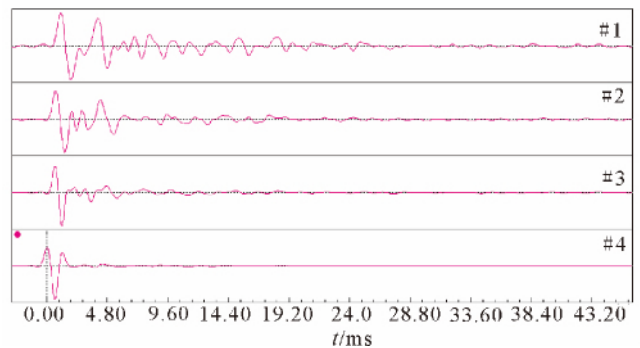
②距起始波峰 6.83 m(软件标称距离,拾振时刻为 3.06 ms)反射信号应为盖梁反射信号。

③由前述分析,应力波在系梁内传播时间为 9.1 ms,图中标称距离为 19.27 m 的信号拾振时刻为 9.33 ms,二者相符,故该信号为系梁反射信号。

④图中右侧无文字标注的实线位置对应拾振时刻为 12.98 ms,与桩底位置拾振时刻(10.32 ms)相差 2.66 ms。按波速 4 400 m/s 计算,则二者标称距离相差 5.85 m。故可认为此信号为桩底反射信号自系梁底面位置传递到盖梁,然后反射至区域 4 拾振器位置引起的传感器振动信号。

(2) 区域 4 激振测试结果分析

区域 4 激振的拾振信号曲线如图 18。从图中可见,区域 1、区域 2 的拾振信号无规律。



: #1:区域 1 拾振; #2:区域 2 拾振; #3:区域 3 拾振; #4:区域 4 拾振)

图 18 左 8-1 桩顶激振、墩柱及桩顶拾振测试结果(区域 4 激振)

Fig. 18 Testing curves of excitation on pile top and vibration receiving on pier and pile top of pile left 8-1 (Excitation in zone 4)

区域 4 拾振信号与图 9 较相似,但桩底反射没

有图9明显,应是激振能量被系梁分化的结果。

由图18提取区域3拾振曲线如图19。

①距起始波峰6.60 m(软件标称距离,拾振时刻2.83 ms)的反射信号为盖梁反射信号。

②图19右侧无文字标注的实线位置拾振时刻为12.10 ms,与桩底位置拾振时刻(9.17 ms)相差2.93 ms。按波速4 400 m/s计算,则二者相差6.44 m。故可认为此信号为桩底反射信号自系梁底面传递到盖梁然后,反射至区域4引起的振动信号。

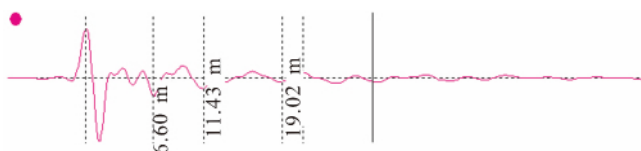


图19 区域3拾振信号曲线(由图18提取)

Fig. 19 Curve of vibration receiving signals in zone 3
(Drawn from Fig. 18)

6 结论与建议

本文探讨了系梁对反射波法检测的影响,并得出以下结论:

(1) 建立桩顶结构物对应应力波干扰的计算公式。该公式与桩顶结构物的几何尺寸、应力波速度相关,可以根据测试点位定量分析系梁等引起的干扰频率,从而评估测试点位的合理性并控制滤波范围。

(2) 检测时拾振器应竖向串列式排列对拾振信号逐个进行异常信号分析,应重点分析其拾取时刻,并借助测定的墩柱、系梁波速判断异常信号发生位置。

(3) 应在拾振信号逐个分析的基础上,将各数据在同一坐标轴中排列,检查反射信号能否形成同相轴。通过同相轴,检验、校核对桩底等已知构造特征反射的判断,然后确定其他反射信号是否异常信号。

图20中实线为对图13信号分析得到的桩底同相轴图示。图21中实线为在对图13信号分析得到的盖梁同相轴图示。

(4) 应根据传感器起始波峰之间的时差,计算对应结构物部位的波速。

(5) 在实际检测中,应注意在系梁上布置测点测定是否存在系梁端部反射及应力波在系梁中的速度。

(6) 桩顶自由时得到的信号特征(如扩径、桩底反射等)可以在墩柱等施工后测试得到的信号中体

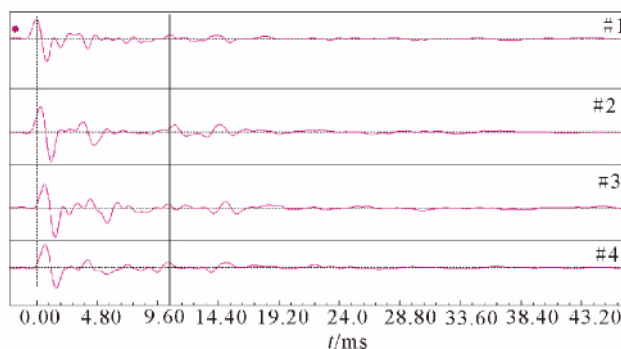


图20 桩底同相轴

Fig. 20 Events of pile bottom

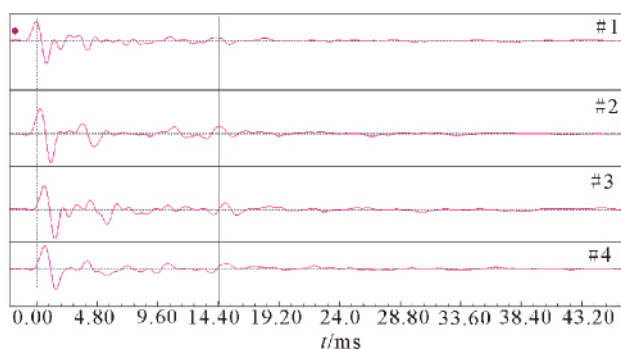


图21 盖梁反射同相轴

Fig. 21 Events of bent cap

现。

(7) 本试验结果表明,系梁、墩柱等施工后测试时,如激振点过于接近拾振点,则测试效果较差。

参考文献(References)

- [1] 马晔,张理轻,杨宇.在役桥梁桩基础低应变反射波法检测试验研究[J].世界地震工程,2010,26(S1):216-220.
- [2] 刘建磊,王新,付信根.低应变反射波法在既有桥梁桩基检测中的应用[J].铁道建筑,2009,(3):10-12.
- [3] 孙晓立,鲁昌河.改进型低应变法检测既有公路桥梁桩基完整性的数值分析[J].广东公路交通,2014,(2):17-19.
- [4] 柴华友,刘明贵,白世伟,等.应力波在承台-桩系统中传播数值分析[J].岩土工程学报,2003,25(5):624-628.
- [5] 柴华友,刘明贵,李祺,等.应力波在平台-桩系统中传播的实验研究[J].岩土力学,2002,23(4):459-464.
- [6] 邵帅.在役高桩梁板式码头桩基完整性快速无损检定方法研究[D].天津:天津大学,2011.
- [7] 彭志豪.高桩码头在役桩基完整性检测方法研究[D].天津:天津大学,2009.
- [8] 季勇志.基于三维导波理论的码头桩基无损检测方法的数值模拟研究[D].天津:天津大学,2010.
- [9] 杨宇,马晔.桥梁桩柱式基础低应变法检测适宜性分析及现场试验[J].地震工程学报,2014,12(4):804-812.
- [10] 吴庆曾.基桩声测与动测技术[M].北京:中国电力出版社,2009.