第 36 卷 第 4 期
2014 年 12 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 36 No.4
Dec., 2014

桥梁在役桩的竖向动力响应特性及损伤识别研究①

卢韦男，张鸿儒

（北京交通大学土木工程系，北京 100044）

摘要：基于 ANSYS LS-DYNA 建立桥梁的墩-承台-桩-土有限元显式动力学模型，模拟桥梁的桩基础在承台上表面施加冲击荷载后完整桩和有断裂缺陷桩的竖向速度响应，分六桩-承台和八桩-承台两种桩基础进行数值计算。结果表明：在所要检测的基桩对应的承台上表面施加冲击力，产生的应力波通过承台到达下方的基桩后沿桩身向下传播，类似于低应变反射波法测桩的原理，应力波在到达桩底桩土交界面或者断裂面等阻抗变化较大处会发生应力波反射，在桩头处的竖向速度响应波形曲线中能识别出反射回的应力波，进而判别桩是完整还是存在断裂损伤；数值计算同时记录承台表面的竖向速度响应，发现承台表面的竖向速度响应波形比桩头处的竖向速度响应波形由于应力波在桩承台界面的多次反射而更加复杂，难以准确判断反射波。

关键词：桥梁桩基础；墩-台-桩-土动力有限元模型；基桩断裂损伤；竖向动力响应；应力波反射；损伤识别

中图分类号：TU473.1；U443　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2014)04－0898－07

DOI：10.3969/j.issn.1000－0844.2014.04.0898

Study on Vertical Dynamic Response Characteristics and Damage Identification of Existing Bridge Pile

LU Wei-nan, ZHANG Hong-ru

(*Department of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: Integrity detection of the pile foundations of existing structures is a difficult problem worldwide. Integrity testing of newly constructed pile foundations includes detection methods such as mining with the observation method, drilling core method, low-strain test method, and ultrasonic method. However, for damage detection of pile foundations in service, the existence of platforms and bridge structures above pile foundations makes the observation method difficult because the mining depth of the soil around the pile is very limited. Drilling core methods cannot be achieved because drill core must be drilled from the pile top. For ultrasonic detection, there is no channel available for installing ultrasonic transducers. For the low-strain test method, velocity sensors cannot be placed at the top of the pile; therefore, vertical vibration cannot be recorded. In this paper, vertical impact load is applied on the upper cap surface above the detected pile. According to the vertical velocity response of the cap surface and pile head, we analyze the integrity of the bridge pile foundation in-service.

Bridge pier-cap-pile-soil explicit dynamic finite element models are based on ANSYS LS-DYNA. In the finite element models, impact load is applied on the cap surface, and the vertical velocity responses of the complete pile and the cracked pile are both recorded. Two types of pier-cap-

① **收稿日期**：2014-08-20

基金项目：国家自然科学基金(90715013)

作者简介：卢韦男(1989－)，男，博士，主要从事桩土动力相互作用及桩基动测技术研究. E-mail：10115253@bjtu.edu.cn

pile-soil numerical models are used in this study with six and eight piles, respectively. The results show that when the impact load is applied at the cap surface on top of the pile to be detected, the stress wave goes through the cap and propagates downward along the pile. Similar to the principle of sonic echo in pile integrity testing, the stress wave reflects at the pile bottom or fracture surface where impedance changes significantly. From the vertical velocity response curve of the pile head, the reflected stress wave from the pile bottom or the fracture surface can be identified to determine whether the pile is complete or cracked. This paper also presents the vertical velocity response of the cap surface; the response curve is more complicated than the pile head because of multiple reflections of stress wave at the pile-cap interface. Therefore, accurate evaluation of the reflected wave is difficult.

Loading the vertical impact at the pile head produces a simpler waveform of vertical velocity response of the pile head than that when using the cap surface. The reflected wave response of the pile head is more obvious, and it is easy to judge the pile bottom or the fracture surface by the reflected wave. Moreover, the waveform of vertical velocity response of the pile head can be used to accurately evaluate the pile integrity. However, arrangement of velocity sensors at the pile head is difficult; that at the cap surface is more practical. The waveform of vertical velocity response of the cap surface is very sensitive to the positions of velocity sensors and changes often. Thus, when recording the vertical velocity response of the cap surface, there is a strong need for a plural arrangement of velocity sensors to measure the response waveform. Such an arrangement is also important for filtering and analysis aided by signal processing technology.

Key words: bridge pile foundation; pier-cap-pile-soil dynamic finite element model; pile fracture damage; vertical dynamic response; stress wave reflection; damage identification

0　引言

桥梁桩基础是桥梁结构的重要组成部分,基桩的完整性对桥梁上部结构的安全至关重要,然而在地震、台风、撞击等偶然荷载作用下,桥梁的承台下基桩可能会发生断裂损伤,在役结构的桩基的动力响应分析及完整性检测目前是国内外的难题。新建桩基的完整性检测已经有多种较成熟的检测方法,如挖掘观察法、钻孔抽芯法、低应变动测法、超声波法等。挖掘观察法是指挖掘桩身周围一定范围内的土体,使桩体出露来观察其完整性;钻孔抽芯法是在桩身顶面向下钻芯取样,通过桩体芯样的完整度来判断桩身完整性;低应变动测法在桩顶布置力锤和信号接收传感器,记录由桩底或缺陷等阻抗变化处传来的声波信号,估算桩底或缺陷位置;超声波探测法在桩体内预留孔道布置发射器和接收器,利用探测到的桩体各位置的超声波波速判断完整度[1-2]。

对于在役桩基的损伤检测,由于受到承台和桥梁结构的影响,观察法对桩体周围土体的挖掘深度十分有限,钻孔抽芯法由于需要从桩顶钻芯而无法实现,若没有预留孔道则无法安装超声波传感器进行超声波探测;低应变动测法无法在桩顶竖向击振和布置速度传感器。近年来国内外学者对在役桩的损伤检测方法研究取得了一些成果,Shutao T. Liao 等[3-4]分别对完整桩和带缺陷桩在脉冲荷载作用下的动力响应进行一维和三维模拟,结果表明一维和三维的数值模拟结果都可以鉴别缺陷的响应特征,三维数值模拟更反映实际情况。Gassman, S. L. 等[5-6]现场试验结合数值模拟研究承台下桩基的低应变动测方法,现场试验中在承台上表面击振,由承台表面布置多个传感器得到速度响应曲线,确定合理的击振位置,并对速度响应曲线多次量测平均,以尽量减小承台表面对应力波反射的影响,提高桩底和缺陷处的波反射的分辨率,但测量结果的准确度仍受桩长细比、桩周土阻尼、承台厚度等因素的影响。Sheng Huoo Ni 等[7-9]改进了低应变动测方法,对桩侧布置的楔形铁块敲击产生沿桩身的竖向应力波,同时在桩对侧承台下 0.5 m 处布置速度传感器以记录竖向的速度时程曲线。研究还发现利用小波信号处理技术获得的时间-频率域信号能更明确的确定桩长和桩身缺陷。Mohammad Sadik Khan 等[10]对某桥梁的在役 H 型钢桩基础用电阻率成像法测定其深度,并结合平行震测法和声波回测法作

为对比，试验结果表明电阻率成像法结合平行震测法能得到较好的结果，声波回测法测定的误差则比较大。由于场地的局限性，电阻率成像法不能检测太深的基础。Olson，L.D.等[11-13]总结了检测桥梁在役桩基础常用方法的特点和不足，包括基础表面测试法（声波回测法、脉冲响应法、弯曲波法、超声震测法等）和钻孔测试法（平行震测法、钻孔雷达、钻孔声测等）。声波回测法、脉冲响应法和弯曲波法适合检测圆柱形高承台桩，检测的深度有限，且受上部柱或承台以及桩周土的影响。脉冲反应法一般只有在桩头附近位置才检测到比较清晰的共振反应。钻孔声测法需要在桩周布置 PVC 管，通过发射高频低波长的声波并在对侧管内接收反射波来进行检测，该法还有待进一步研究和改善。磁度计测试则是通过在桩周钻入的套管内放置磁度计，施加电流后测量桩竖向范围磁场强度，磁度最低所对应的深度也就是桩内钢筋的深度，从而推算桩长。Takuji Hamamoto 等[14]研究了利用振动理论和声发射综合评定在役基桩的完整性方法，先利用加振机试验检测整体的损伤情况，在桩上部结构加击振器击振，桩身布置的加速度传感器测量桩身的响应，通过响应曲线的频域分析得到桩的固有频率。桩身完整性越好，固有频率越高，反之则越低。结合声发射法，在承台及桩头周表面布置声发射传感器，施加动载来检测声发射信号，以验证损伤是否存在。柴华友等[15]利用模型试验的方法研究了应力波在桩承台系统内的传播规律。在承台-桩系统中，平台表面测点接收到的波除了直达的 P 波、S 波，还有平台边界反射波、桩侧反射波。波形判读较为困难，表面测点信号受平台几何尺寸及桩截面尺寸影响，还受激振点、测点位置、桩间距、桩土相互作用、邻桩的影响。通过模型试验结果发现，平台与桩系统下桩的完整性可以在表面由反射法来检测，桩身反射波不仅可以通过波形相位幅值的变化来识别，也可以结合滤波、波形比较等方法。季勇志等[16]运用 ANSYS LS-DYNA 有限元显式分析方法，对混凝土桩在桩顶自由和桩顶受约束时的低应变动测进行数值模拟，并对比两种情况下的动测曲线，发现桩顶受约束时桩的动测曲线不仅受桩周土体的影响，还受到上部结构的干扰，并且桩身反射的三维效应更明显。

尽管桥梁在役桩基础的损伤检测方法取得了一些研究进展，目前在实际检测的操作方便性和结果准确性方面仍然存在困难。本文提出通过对所要检测基桩上部的承台上表面施加竖向冲击荷载，记录检测桩的桩头以及上部承台上表面的竖向速度动力响应，比较分析桩基断裂损伤的存在。

为了探究该方法的可行性，本文通过 Ansys LS-DYNA 显示动力学有限元软件，分析桥梁断裂桩与完整桩的动力响应特征。分六桩-墩-台-土、八桩-墩-台-土两种模型进行数值分析。

1 承台上表面竖向瞬时击振动测法

承台上表面竖向瞬时击振法根据应力波动理论，在土-桩-墩台模型中的承台上施加竖向瞬态击振力产生应力波，在桩头和承台上表面激振点附近记录竖向速度响应。应力波穿过承台传入桩身沿桩身向下传播，其在承台中的传播是三维应力波，既有纵向压缩波成分，也有横向剪切波成分，应力波在桩身传播可近似以一维纵波形式为主，同时还会在承台-桩界面反射产生更复杂的应力波，因此需要在桩头和承台表面选择若干点记录竖向速度响应，比较分析速度波形特征，以提取基桩缺陷信息。

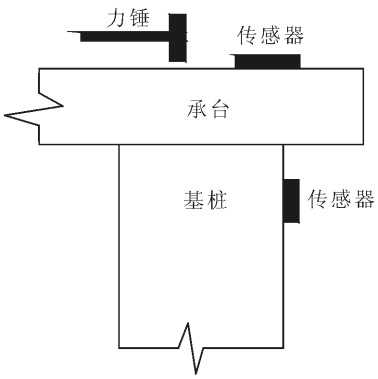


图 1 承台上表面竖向瞬时击振法示意图

Fig.1 Vertical transient vibration method on cap surface

应力波在桩身传播波速与传播时间及桩长的关系：

$$V=\frac{2L}{T} \tag{1}$$

其中 T 为应力波在桩身传播的往返时间；L 为应力波在桩身的单向传播长度。

根据纵向应力波在一维无限长直杆中的波动方程：

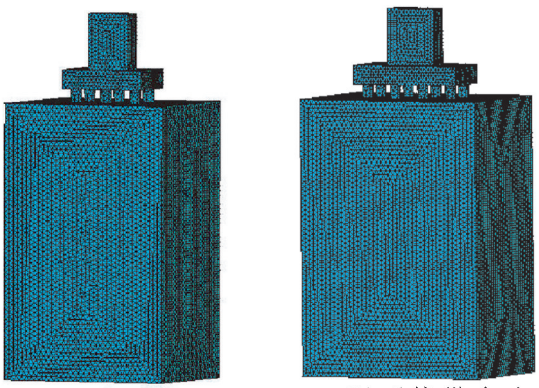
$$E\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}=\rho\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \tag{2}$$

一维杆中的应力纵波波速 c 是：

$$c=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3}$$

2　土-桩-墩-台动力有限元模型与模型参数

本文基于 ANSYS LS-DYNA 显式动力学有限元软件,建立了六桩-墩-台-土模型、八桩-墩-台-土模型两种动力有限元模型进行数值模拟。取桩径 1 m,桩间距 3 m,承台厚度 2 m,完整桩桩长 20 m,断裂破损桩的断裂面假定在距离桩顶 10 m 处。为便于在桩头记录速度响应,模型中土体表面在承台以下 0.5 m。数值模型如图 2 所示。



(a) 六桩-墩-台-土有限元模型　　(b) 八桩-墩-台-土有限元模型

图 2　数值模型

Fig.2　Numerical models

动力有限元模型使用 explicit-solid168 单元划分网格,土体边界条件为吸收边界,以避免应力波反射的影响。桥墩上方表面设置位移约束边界,在断裂面设置 surf-surf 接触。在承台上表面施加冲击荷载为三角形脉冲荷载,荷载持时 1 ms,幅值 200 N。桩基础与土体的物理力学参数如表 1 所示。

表 1　桩基础与土体力学参数取值表

Table 1　Key parameters of the pile foundation and the soil

参数	桩基础	土体
密度/(kg·m^{-3})	2 500	1 800
弹性模量/Pa	4.0 e10	2.5e7
泊松比	0.18	0.35
阻尼比	0.005	0.05

由式(3)及表 1 可知,应力波沿桩身纵向传播的波速 $c=4\ 000$ m/s。已知完整桩桩长 20 m,则在应力波从桩顶入射传到桩底再反射回桩顶的时间 $T=40$ m/4 000(m/s)=0.01 s。桩身断裂面在 10 m 深,则应力波从断裂面反射回桩顶时间 $T=20$ m/4 000(m/s)=0.005 s。

3　计算结果分析

3.1　六桩-墩-台-土模型

如图 3 所示,在六桩-墩-台-土模型中选择 1 号桩(图 3 中右下角的桩)作为检测桩,在 1 号桩上对应的承台上表面施加脉冲荷载,分 1 号桩完整和 10 m 处断裂两种情况进行数值计算,分别记录 1 号桩桩顶处的竖向速度响应及承台表面激振点附近两点的竖向速度响应。

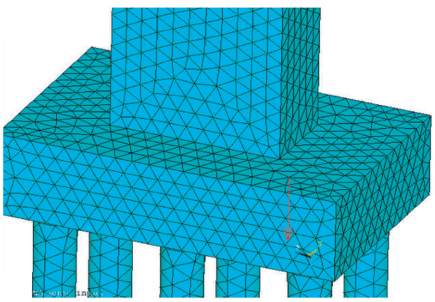


图 3　六桩-墩-台-土有限元模型瞬态加载示意图

Fig.3　Transient loading diagram of the six piles-pier-cap-soil finite element model

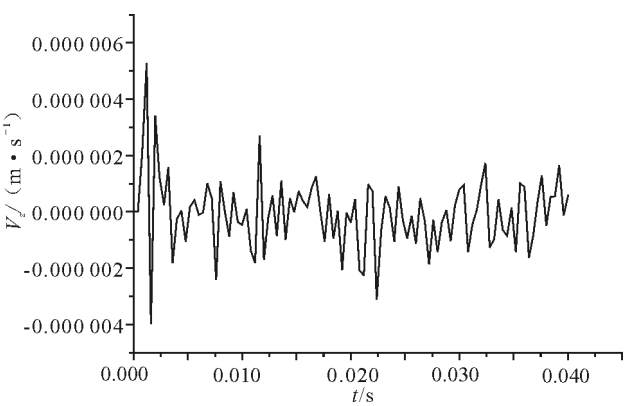


图 4　完整桩的桩顶竖向速度响应曲线

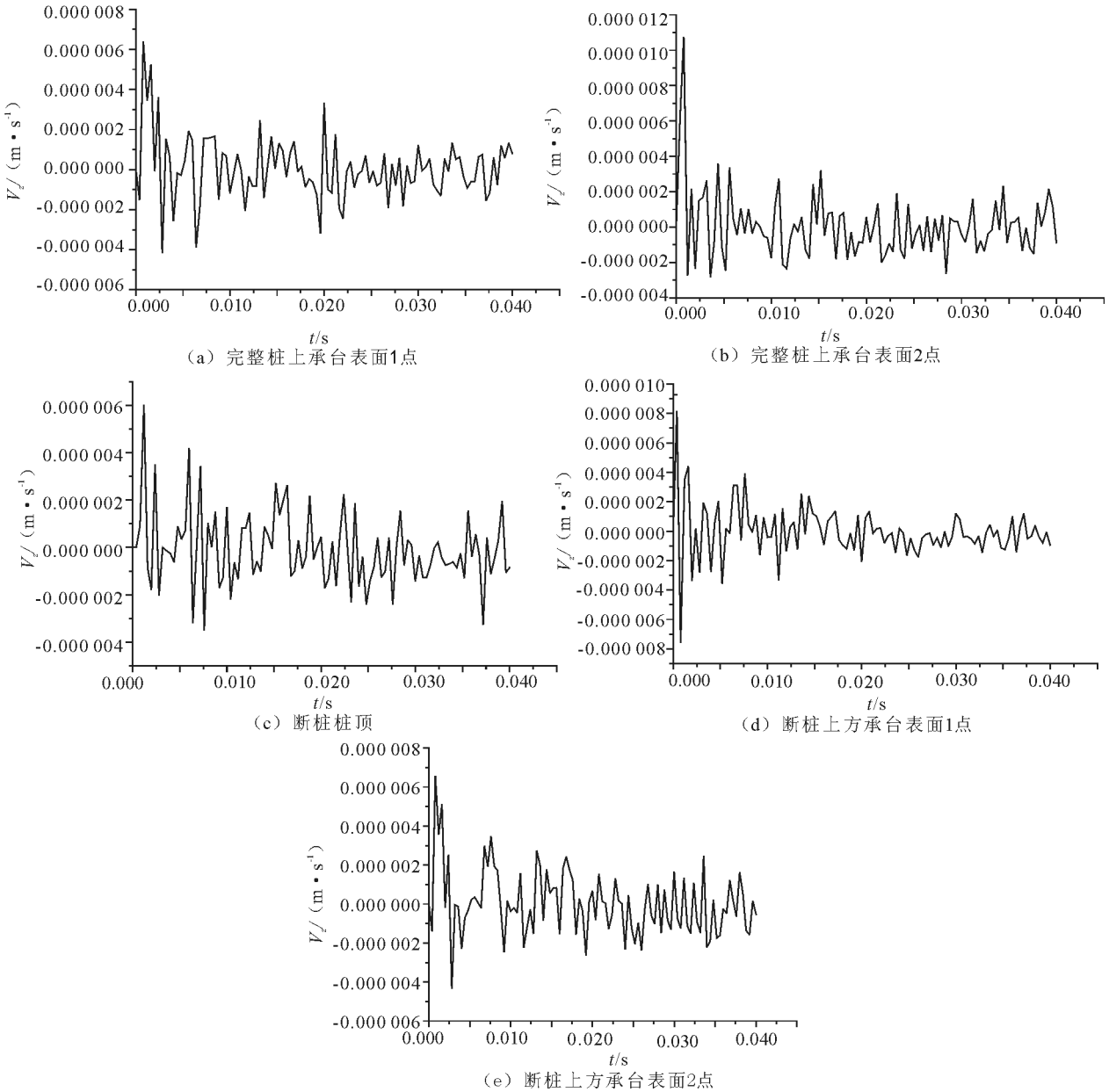
Fig. 4　Vertical velocity response curve of the head of integrated pile

从图 4 所示瞬时击振力引起的完整桩桩顶竖向速度响应曲线可以看出,在 0.002 s 处是击振力引起的桩顶竖向振动响应,响应幅值为 5.2e−6 m/s;在 0.013 s 处是桩底反射波在桩顶的竖向速度响应,幅值为 3e−6 m/s。波形比较简单,反射波容易判断。

从图 5(a)所示瞬时击振力引起的完整桩上承台表面 1 点的竖向速度响应曲线可以看出,在 0.002 s处是击振力引起的承台表面 1 点的竖向振动响应,响应幅值为 6.2e−6 m/s;在 0.014 s 处是桩底反射应力波引起的竖向速度响应,幅值为 2.3e−6 m/s。波形比较复杂,反射波不明显。

图 5(b)所示瞬时击振力引起的完整桩上承台表面 2 点的竖向速度响应曲线中,0.001 s 处是击振力引起的承台表面 2 点的竖向振动响应,响应幅值

为 11e－6 m/s；0.011 s 处是桩底反射波引起的竖向速度响应，响应幅值为 3e－6 m/s。波形较复杂。



(a) 完整桩上承台表面1点

(b) 完整桩上承台表面2点

(c) 断桩桩顶

(d) 断桩上方承台表面1点

(e) 断桩上方承台表面2点

图 5 六桩-墩-台-土模型竖向速度响应曲线

Fig.5 Vertical velocity response curves of six-pile-pier-foundation soil model

图 5(c)所示为瞬时击振力引起的断桩桩顶竖向速度响应曲线，可以看出在 0.002 s 处是瞬时击振力引起的桩顶竖向振动响应，响应幅值为 6e－6 m/s；在 0.007 s 处是桩断裂面的反射波在桩顶的竖向速度响应，幅值为 4e－6 m/s。反射波明显，容易判断。

图 5(d)所示为瞬时击振力引起的断桩上方承台上表面 1 点的竖向速度响应曲线，可以看出在 0.001 s处是瞬时击振力引起的 1 点竖向振动响应，响应幅值为 8e－6 m/s；在 0.007 s 处是桩断裂面的反射波在 1 点的竖向速度响应，幅值为 3e－6 m/s。反射波不明显，前面有多个杂波。

图 5(e)所示为瞬时击振力引起的断桩上方承台上表面 2 点的竖向速度响应曲线，可以看出在 0.002 s处是瞬时击振力引起的 2 点竖向振动响应，响应幅值为 6.5e－6 m/s；在 0.007 s 处是桩断裂面的反射波在 2 点的竖向速度响应，幅值为 3.1e－6 m/s。反射波不明显，波形复杂。

3.2 八桩-墩-台-土模型

与六桩-墩-台-土模型加载方式类似，八桩-墩-台-土模型的瞬态加载如图 6 所示。在八桩-墩-台-

土模型中选择 1 号桩(图 6 中右下角的桩)作为检测桩,在 1 号桩上对应的承台上表面施加脉冲荷载,分 1 号桩完整和 10 m 处断裂两种情况进行数值计算,分别记录 1 号桩桩顶处的竖向速度响应及承台表面激振点附近两点的竖向速度响应。速度响应曲线如图 7 所示。

图 7(a)所示瞬时击振力引起的完整桩桩顶竖向速度响应曲线可以看出,在 0.002 s 处是击振力引起的桩顶竖向振动响应,响应幅值为 5.6e−6 m/s;在 0.013 s 处是桩底反射波在桩顶的竖向速度响应,幅值为 3.3e−6 m/s。波形比较简单,反射波容易判断。

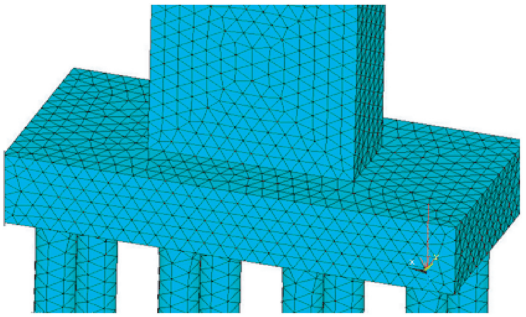
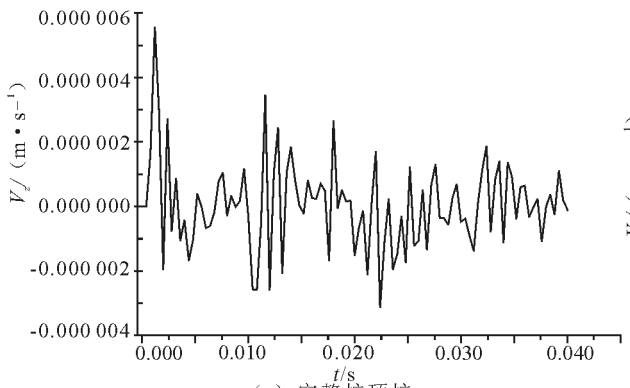
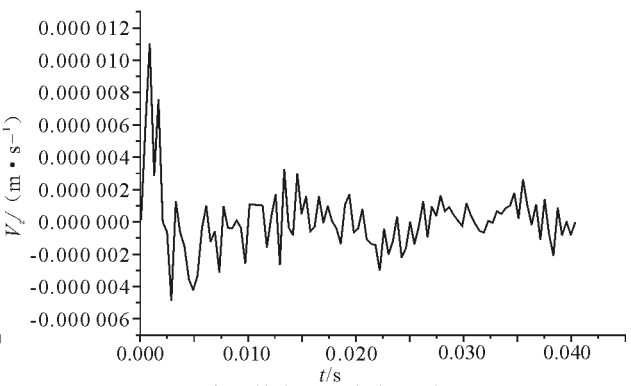


图 6　八桩-墩-台-土有限元模型瞬态加载示意图

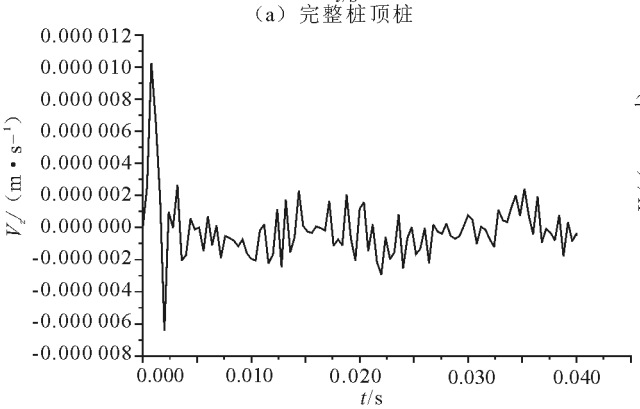
Fig.6　Transient loading diagram the eight piles-pier-cap-soil finite element model



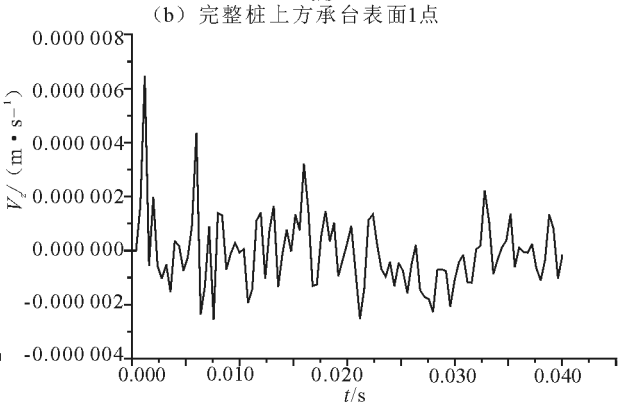
(a) 完整桩顶桩



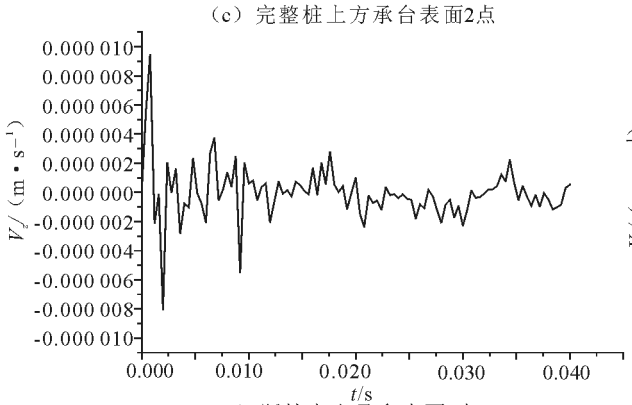
(b) 完整桩上方承台表面1点



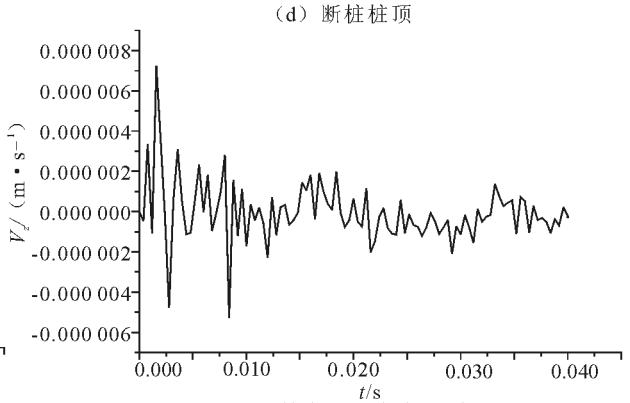
(c) 完整桩上方承台表面2点



(d) 断桩桩顶



(e) 断桩上方承台表面1点



(f) 断桩上方承台表面2点

图 7　八桩-墩-台-土模型竖向速度响应曲线

Fig.7　Vertical velocity response curves of eight pile-pier-foundation soil model

图 7(b)所示为瞬时击振力引起的完整桩上方承台表面 1 点的竖向速度响应曲线可以看出,在 0.001 s处是击振力引起的承台表面 1 点的竖向振动响应,响应幅值为 10.8e－6 m/s;在 0.013 s 处是桩底反射应力波引起的竖向速度响应,幅值为 3e－6 m/s。波形比较复杂,前面有多次杂波。

图 7(c)所示瞬时击振力引起的完整桩上方承台表面 2 点的竖向速度响应曲线,0.001 s 处是击振力引起的承台表面 2 点的竖向振动响应,响应幅值为 10e－6 m/s;0.013 s 处是桩底反射波引起的竖向速度响应,响应幅值为 2e－6 m/s。波形复杂。

图 7(d)所示为瞬时击振力引起的断桩桩顶竖向速度响应曲线,可以看出在 0.002 s 处是瞬时击振力引起的桩顶竖向振动响应,响应幅值为 6.8e－6 m/s;在 0.007 s 处是桩断裂面的反射波在桩顶的竖向速度响应,幅值为 4e－6 m/s。反射波明显,容易判断。

图 7(e)所示为瞬时击振力引起的断桩上方承台上表面 1 点的竖向速度响应曲线,可以看出在 0.001 s处是瞬时击振力引起的 1 点竖向振动响应,响应幅值为 9.5e－6 m/s;在 0.007 s 处是桩断裂面的反射波在 1 点的竖向速度响应,幅值为 3e－6 m/s。反射波不明显,波形中有多个杂波干扰判断。

图 7(f)所示为瞬时击振力引起的断桩上方承台上表面 2 点的竖向速度响应曲线,可以看出在 0.002 s处是瞬时击振力引起的 2 点竖向振动响应,响应幅值为 7.2e－6 m/s;在 0.008 s 处是桩断裂面的反射波在 2 点的竖向速度响应,幅值为 3.2e－6 m/s。反射波不明显,波形复杂。

4 结论

本文通过数值模拟并结合理论分析,比较承台上部竖向脉冲荷载作用下,下部基桩桩头和承台表面的动力响应特征,得到以下结论:在承台竖向冲击荷载作用下,桩头的竖向速度响应波形比承台表面的简单,反射波响应更加明显,易于判断桩底或断裂面处的反射波,可以较准确地判断桩身完整性。但在桩头布置传感器现场操作难度大,若在承台上表面检测,布置传感器更容易,但波形对位置的变化敏感因此需布置多个测点,对响应波形还要结合滤波及信号处理技术辅助分析。

参考文献(References)

[1] 陈凡,徐天平,陈久照,等.基桩质量检测技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2003:97-126.
CHEN Fan,XU Tian-ping,CHEN Jiu-zhao,et al.Pile Quality Detection Technology[M].Beijing:Chinese Architectural Industry Press,2003:97-126.(in Chinese)

[2] 刘屠梅,赵竹占,吴慧明.基桩检测技术及实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:12-88.
LIU Tu-mei,ZHAO Zhu-zhan,WU Hui-ming,et al.Pile Testing Technology and Examples[M].Beijing:Chinese Architectural Industry Press,2006:12-88.(in Chinese)

[3] Shutao T Liao,Jose M Roesset.Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads[J].International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1997,21(2):155-175.

[4] Shutao T Liao,Jose M Roesset.Identification of Defects in Piles Through Dynamic Testing[J].International Journal for Numerical and Analytical Methods In Geomechanics,1997,21(3):277-291.

[5] S C Baxter,M O Islam,S L Gassman.Impulse Response Evaluation of Drilled Shafts With Pile Caps:Modeling and Experiment[J].Journal of NRC Research,1998,29(1):75-78.

[6] Richard J Finno,Sarah L Gassman. Impulse Response Evaluation of Drilled Shafts[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1998,124(10):331-344.

[7] Kuo Feng Lo,Sheng Huoo Ni,Yan Hong Huang.Non-Destructive Test for Pile Beneath Bridge in the Time,Frequency,and Time-frequency Domains Using Transient Loading[J].Nonlinear Dynamics,2007,62(9):349-360.

[8] Sheng Huoo Ni,Kuo Feng Lo,Lutz Lehmann,et al.Time-frequency Analysis of Pile Integrity Testing Using Wavelet Transform[J].Computers and Geo-technics,2008,35(8):600-607.

[9] Yan Hong Huang,Sheng Huoo Ni.Experimental Study for The Evaluation of Stress Wave Approaches on a Group Pile Foundation[J].NDT and International,2012,47(6):134-143.

[10] Mohammad Sadik Khan.Evaluation of Resistivity Lmaging Method for Determining Unknown Deep Foundation Depth [D].Science in Civil Engineering,the University of Texas at Alington,2011:9-110.

[11] Olson LD,Jalinoos,Marwan FA.Determination of Unknown Subsurface Bridge Foundations [J].Geotechnical Guideline of NCHRP,1998,21(5):113-124.

[12] Olson L D,Jalinoos F,Marwan F A.Determination of Unknown Subsurface Bridge Foundations [J]. Geotechnical Guideline No.16,A Summary of Nchrp 21-5 Interim Report,Federal Highway Administration,Washington,D.C.113-124.

[13] Sack D A,Olson L D.Combined Parallel Seismic and Core Penetrometer Testing of Existing Foundation for Foundation Length and Evaluation[J].Proc Int Found Equip Expo,2009,6(12):544-551.

(下转 918 页)