

桩基础对邻近场地冲击荷载的响应分析

刘毓胤¹, 刘一鸣²

(1.福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 桩基础对邻近场地作用冲击荷载的响应本质上是桩-土组成的体系在冲击荷载下的整体动力相互作用问题。为了研究该问题, 采用有限元法模拟冲击荷载引起桩基础的振动。利用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立了有限元-无限元 (FE-IFE) 耦合分析模型, 分析了冲击荷载作用时桩基础动力响应的规律, 并对影响桩基础响应的因素进行了探讨。计算结果表明, 桩的振动程度取决于冲击荷载作用间距和冲击荷载能量, 而冲击荷载作用间距越远, 桩的振动波长越长。

关 键 词: 冲击荷载; 桩-土动力相互作用; 有限元-无限元耦合分析

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Analysis of pile foundation response to impact loading on adjacent field

LIU Yu-chuan¹, LIU Yi-ming²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The problem of pile foundation response to impact loading on adjacent field is a dynamic interaction of the whole system consisting of piles and soil under the impact load. To study the potential vibration of the pile foundation affected by impact loading on adjacent field, the vibration is simulated with finite element method (FEM). Using FEM software of ABAQUS a coupled finite element-infinite element (FE-IFE) model is created; the pile foundation response to impact loading on adjacent field is analyzed; then the factors affected pile foundation response are considered; some useful conclusions are drawn; the value of vibration amplitude is determined by energy of impact loading and distance between pile foundation and impact site; and the wavelength of pile foundation vibration is determined by distance between pile foundation and impact site.

Key words: impact loading; pile-soil dynamic interaction; finite element-infinite element (FE-IFE) coupled analysis

1 引 言

由于科技的发展和社会的进步, 现代建筑不仅体积变得越来越大, 而且重量也变得越来越重, 这对建筑基础提出了越来越高的要求。桩基础作为深基础中最常见的一种形式, 因其具有承载力大、稳定性好、沉降值小、抗震性能优良, 且能适应各种地基条件等优点, 被广泛地应用于高层建筑、重型厂房、桥梁、码头等工程中。

伴随着桩基工程的迅速发展和广泛应用, 桩-土动力相互作用问题已经成为岩土工程研究的重要课题。关于桩-土动力相互作用的研究, 主要集中在地震荷载作用下桩基的抗震性能以及震害机制等方面^[1]。

另一类工程中较为常见的桩-土动力相互作用问题是邻近场地作用打桩或者强夯等冲击荷载对已存在的桩基的振动问题。对于该类问题, 人们通常将桩作为非连续屏障研究其隔振作用^[2], 而对引起的桩基本身的振动研究较少。

场地上作用打桩或者强夯等冲击荷载时, 振源处释放巨大的能量产生地基振动, 并以波动的形式向外传播^[3]。很多学者对冲击荷载引起地基振动的机制进行了研究。冲击荷载作用在地基上, 能量以压缩波 P 波和剪切波 S 波的形式传递给地基, 当这两种波在地基表面相遇时, 两种波的部分能量就转化为 Rayleigh 波 R 波的形式在地基表面传播。冲击荷载产生的波场通常在地表至地表下几十米的地基浅层传播, 当波在传播过程中遇到地上或者低下的

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 福建省新世纪优秀人才支持项目 (No. XSJRC2007-15)。

第一作者简介: 刘毓胤, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程灾害治理方向的研究工作。E-mail: liuyuchuan@fzu.edu.cn

建筑物时就引起建筑物的振动。

邻近场地作用冲击荷载对桩基的影响主要表现在以下 3 个方面^[4]：一是冲击荷载产生的波在传播过程中将使桩产生竖向和横向位移，当位移幅值较大而波的频率又较高时，可能引起桩基的破坏；二是冲击荷载产生的波的频率与桩的固有频率接近时，将引起桩的共振，从而破坏桩基础；三是桩-土材料不同对波的响应不同，从而造成桩基础承载力下降，沉降增加。

本文将采用 ABAQUS^[5]建立有限元-无限元耦合分析的桩-土动力相互作用模型^[6-9]，分析不同冲击荷载作用距离、冲击荷载作用深度和冲击荷载能量对桩基振动的影响规律。

2 FE-IFE 耦合模型的建立

2.1 本构模型

在桩-土动力相互作用分析中，当土体进入塑性阶段时，由于桩的刚度比土体大得多，所以可以视为仍处在弹性变形阶段。基于这种理论，本文中桩基础采用各向同性线弹性本构关系，而土体的本构模型则基于弹塑性增量理论，选用 Drucker-Prager（简称 D-P）屈服准则的弹塑性本构模型。

ABAQUS 对经典的 D-P 模型进行了扩展，扩展的 D-P 模型的屈服面在子午面上包括线性模型、双曲线模型和指数模型。本文选用的是线性模型。线性 D-P 模型在 π 平面上的屈服面不是圆形的，如图 1 所示，非圆形的屈服面可以真实地反映不同的三轴拉伸和压缩强度、 π 平面上的塑性流动以及不同摩擦角和剪胀角。

线性 D-P 模型的主要参数有：摩擦角 β 、膨胀角 ψ 、材料的黏聚力 c 。

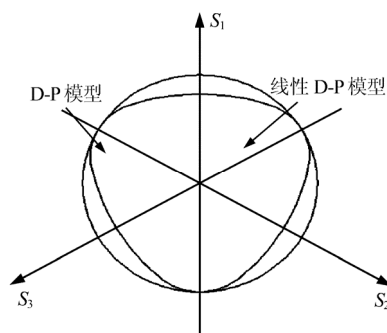


图 1 π 平面上线性 D-P 模型典型屈服面
Fig.1 Typical yield plane of linear D-P model on π plane

2.2 桩-土动力接触

接触面之间的相互作用包含两部分：一部分是

接触面间的法向作用；另一部分是接触面间的切向作用。对于法向作用，接触压力和间隙的默认关系为“硬接触”，其含义为：接触面之间能够传递的接触压力的大小不受限制；当接触压力变为 0 或者负值时，两个接触面分离，并且去掉相应节点上的接触约束。对于切向作用，采用的接触模型为库仑摩擦，即使用摩擦系数来表示接触面之间的摩擦特性，如图 2 所示。其公式为

$$\tau_{crit} = \min(\mu p, \tau_{max}) \quad (1)$$

式中： τ_{crit} 为临界剪应力； μ 为摩擦系数； p 为法向接触压强； τ_{max} 为由用户指定的摩擦应力极限。本文中桩-土之间的摩擦系数取 0.3。

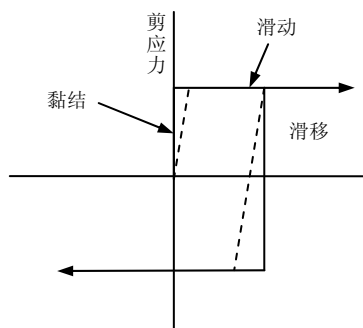


图 2 接触面的摩擦特性
Fig.2 Friction property on interface

2.3 FE-IFE 模型、单元类型以及材料参数

ABAQUS 单元库中几乎所有单元都适用于动力问题分析，选取单元的一般原则与静力分析相同。但在模拟冲击和爆炸荷载时应该选用一阶单元，因为一阶单元具有集中质量公式，模拟应力波时的效果优于二阶单元采用的一致质量公式^[5]。因此，为了更好地模拟桩土在巨大冲击荷载作用下的相互作用，本文中桩体和近域土体采用一阶 4 节点平面应变减缩积分单元（CPE4R），而远域土体采用线性 4 节点单向无限单元（CINPE4）。

在动力有限元分析过程中，单元网格的尺寸是影响分析结果精确度的一个重要因素。因此，划分有限元网格时，要考虑到动荷载的频率特性，否则将增大计算的误差。Lysmer 等^[10]认为，为了精确地模拟波在模型中的传递，单元的尺寸 Δl 必须小于大约 1/10~1/8 输入波的最高频率部分相关的波长。根据计算，本文中土体的单元尺寸取为 0.5 m。

本文中的土体采用 D-P 弹塑性模型，而桩体采用线弹性模型。土体材料计算参数如表 1 所示，桩体及承台的材料参数如表 2 所示。土层的分布情况见图 3，桩-土系统有限元-无限元模型见图 4。

表1 土体参数
Table 1 Properties of soils

材料	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ /(°)	阻尼比 ξ
杂填土	1.89	20	0.35	20	35	0.08
软黏土	1.80	10	0.41	40	20	0.10
残积土	2.00	300	0.25	100	40	0.06

表2 桩及承台参数
Table 2 Properties of pile and cap

材料	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	密度 ρ /(g/cm ³)
桩及承台	30	0.2	2.5

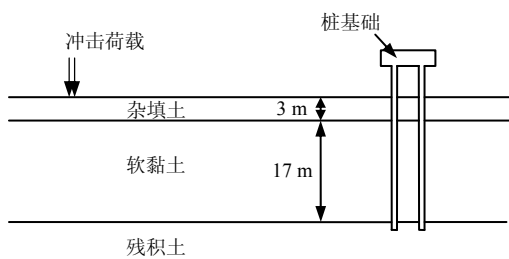


图3 土层分布图
Fig.3 Distribution of soil layers

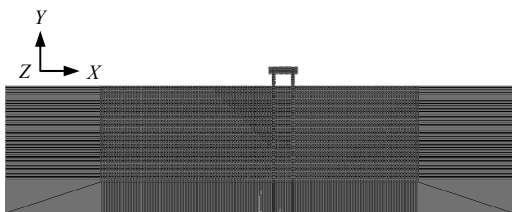


图4 桩-土系统有限元-无限元耦合模型
Fig.4 FE-IFE coupled model of pile-soil system

2.4 冲击荷载形式

强夯、打桩或者冲孔桩产生冲击荷载的形式大致相同，都是重锤从高处产生很大的冲击力。根据接触应力的实测结果，重锤和接触面的冲击碰撞过程中，应力波为一尖波，均没有明显的第2应力波，作用的时间为0.04~0.20 s^[11]。由于这一特性，在分析这类问题时，通常把瞬态冲击荷载概化为三角荷载或者半正弦形式^[12]。本文中冲击荷载简化为三角形的形式，作用时间 t_N 取0.10 s，如图5所示。

3 算例验证

现验证有限元-无限元耦合分析方法的可靠性。在弹性半空间作用竖向冲击荷载，荷载形式如图5所示， $P_{max} = 1.0$ MPa， $t = 0.10$ s，求解荷载作用中心点处的应力以及位移响应。

介质弹性模量 $E = 2.0$ GPa，泊松比 $\nu = 0.3$ ，

质量密度 $\rho = 2.0$ g/cm³，截取150 m(长)×75 m(高)的长方形有限区域进行计算，用四边形单元分割，单元尺寸为 $\Delta x = \Delta y = 0.5$ m，采用ABAQUS隐式积分算法，采用程序自动设置的时间增量步。

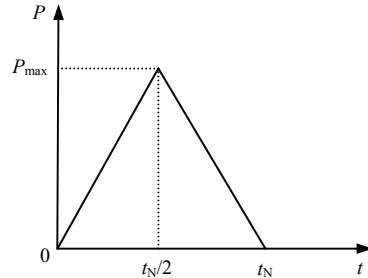


图5 冲击荷载形式
Fig.5 Form of impact load

图6给出了弹性半空间作用竖向冲击荷载作用下荷载作用中心点处的竖向应力与竖向位移的时程曲线。从图6(a)可以看出，采用有限元-无限元耦合分析或采用固定边界方法分析的应力结果都与实际的荷载吻合得较好。从图6(b)可以看出，采用有限元-无限元耦合分析方法得到的竖向位移为单峰，而后竖向位移趋向于0，这体现了人工边界逸散冲击荷载产生的向远场传播的能量的作用，而采用固定边界方法分析的结果中竖向位移产生了反复震荡。

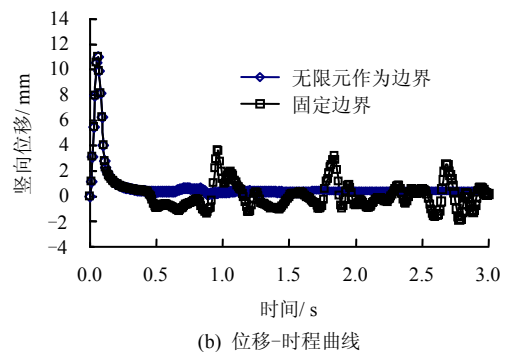
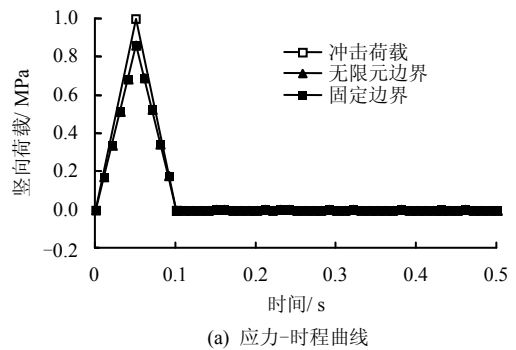


图6 竖向应力与竖向位移-时程曲线
Fig.6 Time history of stress and displacement in vertical direction

根据文献[11]中给出的资料，本文采用有限元-无限元耦合分析的方法，分析了强夯作用下地表竖向速度峰值沿水平距离的衰减规律，如图 7 所示，数值分析结果与实测结果吻合较好。

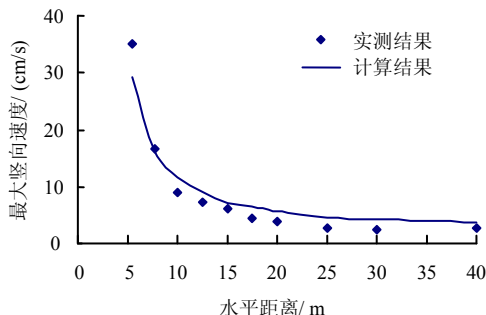
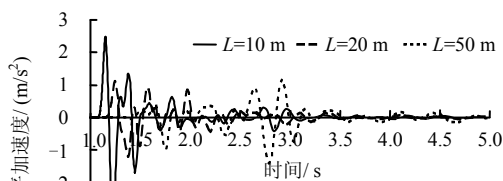


图 7 地表竖向速度峰值沿水平距离衰减曲线
Fig.7 Attenuation curve of peak vertical velocity along horizontal distance

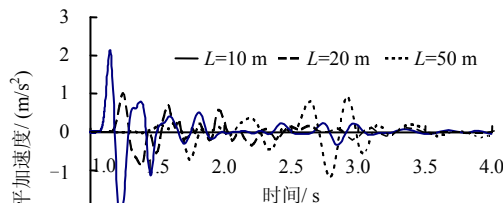
4 影响因素分析

4.1 冲击荷载距离的影响

图 8、9 分别为承台顶和前桩桩头处的水平加速度-时程曲线图和水平位移-时程曲线图。从图 8 可以看出，随着冲击荷载作用区域与群桩基础距离 L 的增大，加速度-时程曲线的频率明显降低，峰值加速度减小，峰值出现的时间越来越晚，并且无优势波峰出现。这是由于冲击荷载作用下，土体内产生了不同的波，有 P 波、S 波，在土体表面由于两种波的衍射还会产生表面的 R 波，这 3 种波的传播速度不同。当作用区域距离桩基较近时，桩体受到

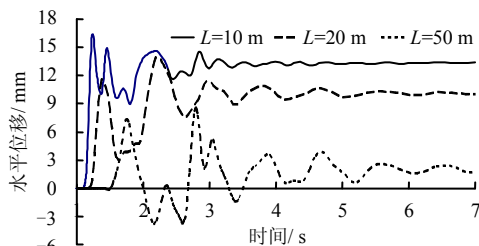


(a) 承台顶部

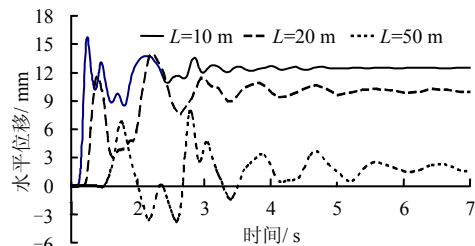


(b) 前桩桩头

图 8 冲击荷载距离桩基不同时水平加速度-时程曲线
Fig.8 Time history of horizontal accelerations under different distances between impact load and piles



(a) 承台顶部



(b) 前桩桩头

图 9 冲击荷载距离桩基不同时水平位移-时程曲线
Fig.9 Time history of horizontal displacements under different distances between impact load and piles

3 种波的共同作用。当作用区域距离桩基较远时，3 种波到达的时间不同，故而出现单一较大波峰。同时由于场地辐射阻尼和材料阻尼的作用，距离作用区域越远的桩基其响应的频率越低，波长越长，峰值越小。从位移-时程曲线可以看出，随着作用区域与桩基距离的增大，桩身的水平位移越来越小，并且位移的峰值由出现在第 1 峰变成出现在第 2 峰，这与半空间中波的能量分布吻合。

4.2 冲击荷载作用深度的影响

图 10、11 分别给出了冲击荷载作用在土体不同深度时出承台顶部水平加速度和水平位移的时程响应曲线，图 12、13 分别给出了冲击荷载作用在土体不同深度时前、后桩水平加速度峰值和水平位移峰值沿桩身分布的曲线。

从图 10 可以看出，承台顶和前桩桩头处的水平加速度-时程曲线随冲击荷载作用深度的增加并不具有明显的规律性。而从图 11 可以看出，承台顶部和前桩桩头处的水平位移随时间的变化规律大体相同，当冲击荷载作用在填土和软黏土交界处时，各点水平位移最大，随着冲击荷载作用深度的增加，各点的水平位移随之减小。

从图 12 冲击荷载作用在不同深度时前桩水平加速度中可以看出，加速度峰值沿桩身的分布与其随时间的变化相似，与冲击荷载作用深度之间无明显规律性。而在图 13 中，从水平位移峰值沿桩身的分布可以看出：当冲击荷载作用在填土层和软黏土之间时，桩身的水平位移峰值最大，随着冲击荷

载作用深度的增加,沿桩身水平位移峰值随之减小,这与承台顶及前、后桩桩头处水平位移随时间的变化规律一致。

4.3 冲击能量的影响

图 14、15 分别给出了不同冲击能量下桩基础承台顶和前、后桩桩头处的水平加速度和水平位移-时程曲线,图 16、17 分别给出了相应的前、后桩水平

加速度和水平位移峰值沿桩身的分布。从图 14 和图 15 可以看出,冲击能量的不同,对承台顶部和前桩桩头的水平加速度和水平位移-时程响应的形式相同,而冲击荷载能量越大,水平加速度和水平位移峰值就越大。而在图 16、17 水平加速度峰值和水平位移峰值沿桩身变化的曲线图中,也可以得到类似的结论。

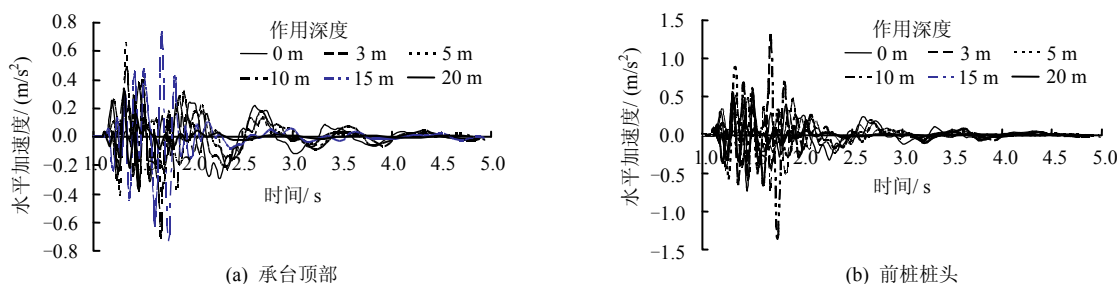


图 10 冲击荷载作用深度不同时水平加速度时程曲线

Fig.10 Time history of horizontal accelerations under different depths of impact load

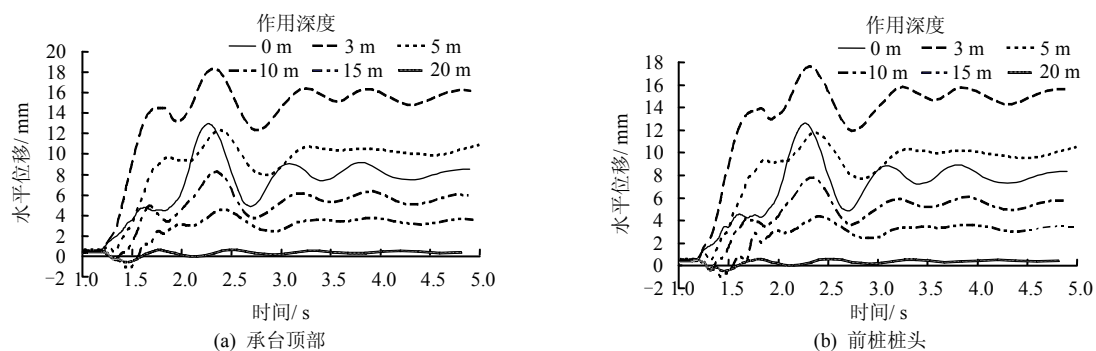


图 11 冲击荷载作用深度不同时水平位移-时程曲线

Fig.11 Time history of horizontal displacements under different depths of impact load

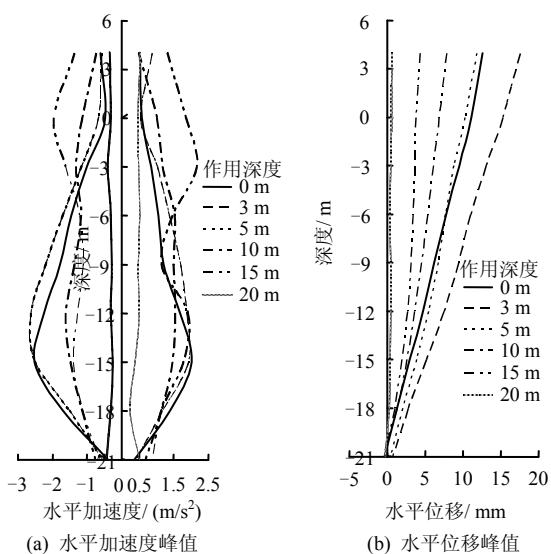


图 12 冲击荷载作用深度不同时前桩水平加速度、位移沿桩身分布

Fig.12 Distribution of amplitudes of horizontal acceleration and displacement along front pile under different depths of impact load

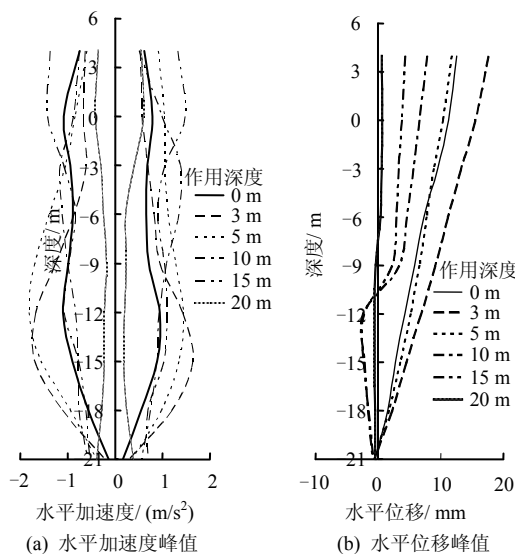


图 13 冲击荷载作用深度不同时后桩水平加速度、位移沿桩身分布

Fig.13 Distribution of amplitudes of horizontal acceleration and displacement along back pile under different depths of impact load

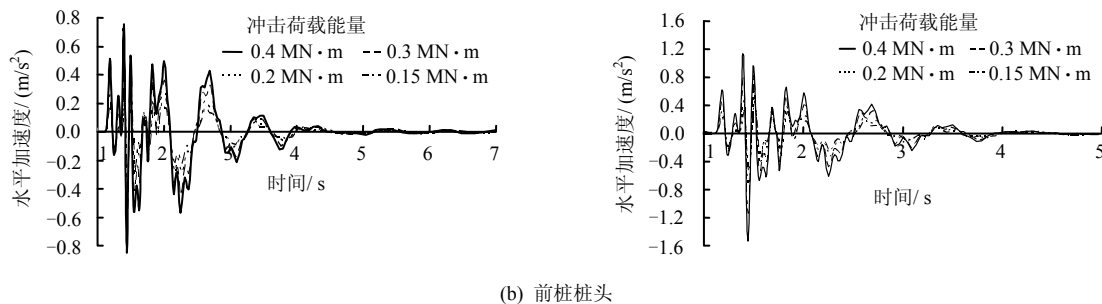


图 14 冲击能量不同时水平加速度-时程曲线

Fig.14 Time history of horizontal accelerations under different impact energies

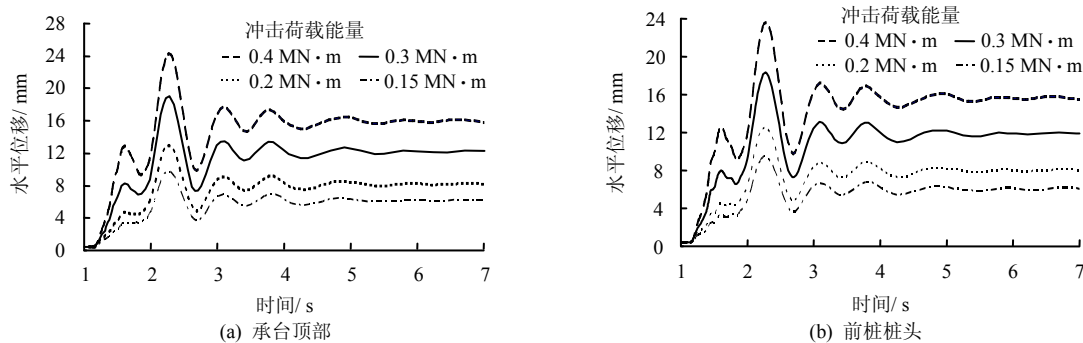


图 15 冲击能量不同时水平位移-时程曲线

Fig.15 Time history of horizontal displacements under different impact energies

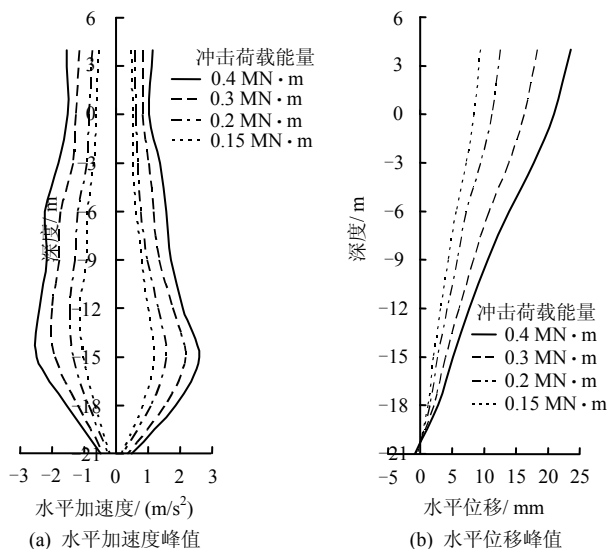


图 16 冲击能量不同时前桩水平加速度、位移沿桩身分布

Fig.16 Distribution of amplitudes of horizontal acceleration and displacement along front pile under different impact energies

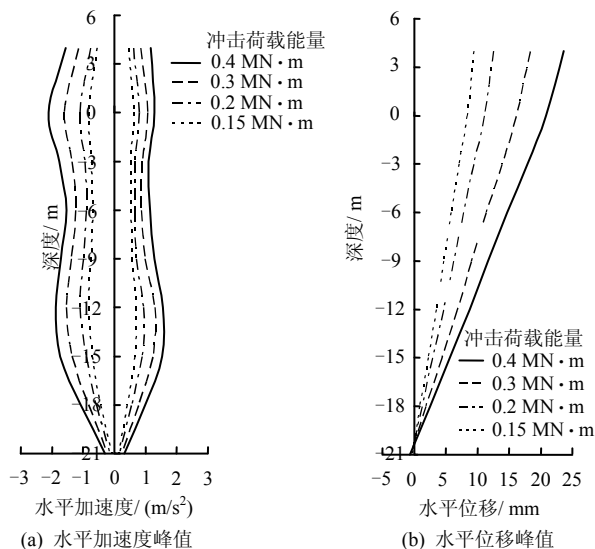


图 17 冲击能量不同时后桩水平加速度、位移沿桩身分布

Fig.17 Distribution of amplitudes of horizontal acceleration and displacement along back pile under different impact energies

5 结 论

(1) 桩基础的振动形式与冲击荷载作用的地点与桩基础的距离有关，距离越远，引起桩基础振动的幅值就越小，而振动的波长也越长。

(2) 桩基础的振动与冲击荷载作用位置随深度

的增加没有明显的规律性。当冲击荷载作用深度为 3 m，并处于土层交界的区域时，桩基础的水平位移峰值达到最大，而桩基础水平加速度位移峰值出现在冲击荷载作用深度为 15 m 时。

(3) 冲击能量的高低决定了桩基振动响应幅值的大小，能量越大，桩基础的振动响应幅值就越大。

参 考 文 献

- [1] 黄雨, 八嶋厚, 张锋. 液化场地桩-土-结构动力相互作用有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 646—651.
HUANG Yu, YASHIMA Atsushi, ZHANG Feng. Finite element analysis of pile-soil-structure dynamic interaction in liquefiable site[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(6): 646—651.
- [2] 高广运, 杨先健, 王贻荪, 等. 排桩隔振的理论及应用[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(4): 58—69.
GAO Guang-yun, YANG Xian-jian, WANG Yi-sun, et al. Theory and application of vibration isolation by piles in rows[J]. **Journal of Building Structures**, 1997, 18(4): 58—69.
- [3] 牛志荣, 路国运. 土体受冲击时 Rayleigh 波作用机制探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1583—1589.
NIU Zhi-rong, LU Guo-yun. Discussion on mechanism and effect of Rayleigh wave on soil subjected to impact loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1583—1589.
- [4] THANDAVAMOORTHY T S. Piling in fine and medium sand—a case study of ground and pile vibration[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(4): 295—304.
- [5] Hibbitt Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS/ Standard User's Manual; ABAQUS/CAE User's Manual; ABAQUS Keywords Manual; ABAQUS QUS Theory Manual[M]. Pawtucket: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002.
- [6] 尹雄, 杨宝玉. 打桩振动环境效应的有限元—无限元耦合分析[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 51—55.
YI Xiong, YANG Bao-yu. Analysis with finite-infinite elements coupling for environmental effect of pile driving vibration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 51—55.
- [7] 陈云敏, 凌道盛, 周承涛. 打桩振动近场波动的数值分析和实测比较[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 178—184.
CHEN Yun-min, LING Dao-sheng, ZHOU Cheng-tao. Numerical analysis and test of pile driving vibration[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2002, 15(2): 178—184.
- [8] 李怡闻, 周健. 土-结构动力相互作用分析打桩引起相邻隧道振动[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 60—65.
LI Yi-wen, ZHOU Jian. Analysis of tunnel vibration due to pile driving under soil-structure dynamic interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(1): 60—65.
- [9] 尚守平, 莫颖, 熊辉. 有限元-无限元耦合在桩-土动态反映中的应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(4): 1—5.
SHANG Shou-ping, MO Ying, XIONG Hui. Application of FEM-IEM coupling method in dynamic response for pile-soil system[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2009, 36(4): 1—5.
- [10] LYSMER J, WAAS G. Shear waves in plane infinite structures[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1972, 98(EM1): 85—105.
- [11] 陈超, 徐长节, 蔡袁强. 强夯加固回填土地基振动特性的三维数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 119—122.
CHEN Chao, XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. Three-dimensional numerical simulation on vibration characteristic of backfilled soil caused by dynamic compaction[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2009, 41(12): 119—122.
- [12] 吴铭炳, 王钟琦. 强夯机制的数值分析[J]. 工程勘察, 1989, (3): 1—5.
WU Ming-bing, WANG Zhong-qi. Numerical analysis of dynamic compaction[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 1989, (3): 1—5.