

张富.基坑桩地震冲击下的受力分析模型仿真[J].地震工程学报,2018,40(3):466-472.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.466

ZHANG Fu.Simulation of Force Analysis Model for Foundation Pit Pile under Seismic Impact[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(3):466-472.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.466

# 基坑桩地震冲击下的受力分析模型仿真

张 富

(南充职业技术学院土木与建筑工程系,四川 南充 637131)

**摘要:**当前利用改进动力 Winkler 模型分析基坑桩地震冲击下的受力情况,不能预防应力波的反射作用,导致其分析结果具有不全面、准确性低的缺点。本论述提出有限元数值模拟的基坑桩地震冲击下的受力分析模型,通过基坑桩小应变模型描述不同应力状态下基坑桩模量的变化,采用有限元数值模拟方法结合基坑桩小应变模型对基坑桩有限元模型进行塑造。在约束基坑桩有限元模型边界条件时,模型选择黏性阻尼器的吸收边界,使模型边界上的应力波不会遭到折射,避免运算结果出现误差。利用 Newmark 方法对基坑桩有限元模型进行动力时程分析,实现基坑桩在不同应力状态下的受力分析。实验结果证明:所提模型能够有效、准确的对地震冲击下的基坑应力分布、基坑桩身弯曲度、变形位移以及桩体水平位移差值对比等进行全面的分析。

**关键词:** 基坑桩; 地震冲击; 受力分析; 数值模拟; 有限元模型; 动力时程

**中图分类号:** TU398; TU473.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2018)03-0466-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.466

## Simulation of Force Analysis Model for Foundation Pit Pile under Seismic Impact

ZHANG Fu

(Department of Civil and Architectural Engineering, Nanchong Vocational and Technical College, Nanchong 637131, Sichuan, China)

**Abstract:** At present, when using the improved dynamic Winkler model to analyze the stress conditions of foundation pit piles from earthquake shock, the reflection effect of the stress wave cannot be prevented, which renders the analysis result noncomprehensive and inaccurate. In this paper, we propose a stress analysis model for foundation pit piles subjected to seismic impact. We use a small strain model for foundation pit piles to describe the modulus change of the pile under different stress states, and use the finite element numerical simulation method to establish a finite element model for foundation pit piles in combination with the small strain model. When setting the boundary condition constraints of the finite element model for foundation pit piles, we choose an absorbent boundary of viscous dampers to prevent the refraction of the stress wave on the model boundary, and thereby avoid calculation error. We use the Newmark method to analyze

**收稿日期:** 2017-08-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51304169)

**作者简介:** 张 富(1975-),男,四川南充人,高级工程师,注册一级结构工程师、注册岩土工程师,研究方向为建筑工程、岩土工程。

E-mail:nczfjgsj@sina.com。

the dynamic time history of the finite element model and determine the stress of foundation pit piles under different stress states. The experimental results show that the proposed model can effectively and accurately analyze the stress distributions of foundation pits and the bending moments and deformation displacements of the piles.

**Key words:** foundation pit pile; seismic impact; stress analysis; numerical simulation; finite element model; dynamic time history

### 0 引言

我国处于地震频发地带,地震的冲击带给国家、人民惨重的财物损失及生命安全威胁。随着经济社会的极速发展,建筑楼层的增加,人们对建筑物抗震安全的要求开始提升,但是建筑基坑桩高、阔、难等特征比较突出<sup>[1]</sup>,因此,对基坑桩地震冲击下受力仿真模型进行荷载性能和受力变形规律分析,对提高建筑基坑桩的稳定性能具有重要作用。

以往相关人员针对基坑桩在地震冲击下受力情况的分析方法存在一定弊端,如文献[2]通过对基于非限制性结构的震动加速度实施仿真,采用该加速度获取基坑桩在地震冲击下的振动情况,不能得到基坑桩的应力分布以及桩体变形等受力信息;文献[3]对深基坑双排桩结构受力变形机理和计算模型进行分析,进而获取基坑桩地震冲击下的受力情况,但是其仅针对双排基坑桩的受力进行分析,具有一定的局限性;文献[4]通过分析基坑对场地地震响应影响的数值情况,获取地震冲击下的基坑桩数值变化情况,但是却无法获取基坑桩的受力状态。因此,本文提出了基于有限元数值模拟的基坑桩地震冲击下的受力分析模型,有效、准确的对地震冲击下的基坑应力分布、地震冲击前后基坑桩身弯曲度、变形位移以及桩体水平位移差值对比等进行全面的仿真分析。

### 1 有限元数值模拟的基坑桩地震冲击下的受力分析模型

数值模拟方法是实用性非常高的基坑工程研究方法,在现有 ANSYS 有限元环境下构建本构模型,需要保证本构模型与土体相适宜,这直接关系到基坑工程数值模拟结果的好坏。在实施基坑工程数值模拟过程中,要选择既能体现关键点的特征又尽量保证应用过程简单的有限元土体本构模型。

#### 1.1 构建基坑桩小应变模型

基坑桩小应变模型在有限元本构模型构建中具有重要的应用价值,小应变模型图如图 1 所示。基于以往的文献资料发现,在实际工程开发中基坑桩的小应变发生概率最高,多模量及非线性是其主要

特点<sup>[5]</sup>。构建基坑桩小应变模型可以仿真应力条件发生变化时基坑桩模量的改变,能更准确的体现基坑桩的真实状态。

土体刚度应变较小,但当应变逐渐增长时,土体刚度开始呈非线性改变,如图 2 所示,对土体刚度和剪应变进行研究获取土体刚度走势。

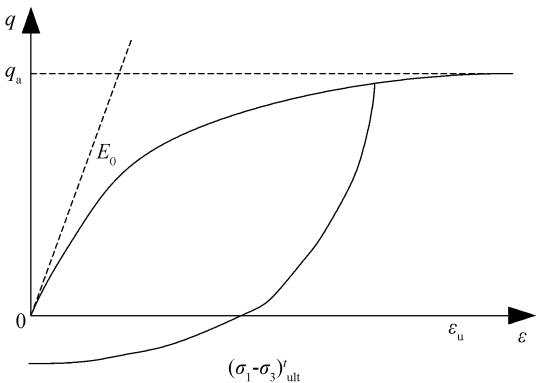


图 1 小应变模型  
Fig.1 Small strain model

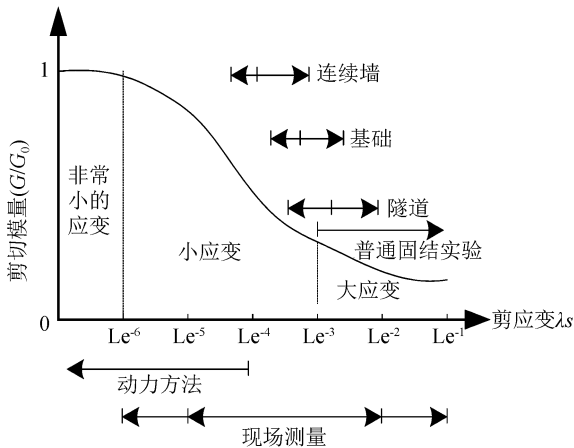


图 2 小应变模型刚度-应变曲线  
Fig.2 Stiffness-strain curve of the small strain model

基坑桩小应变模型在减少负荷,再提升负荷的过程中,兼顾小应变土体刚度及土体在全部应变界限中的非线性特征,获取小应变模量  $G_0$  及剪切应变水平  $\gamma_{0.7}$ 。在分析塑性硬化的过程中<sup>[6]</sup>,实现曼辛规则需要通过开端条件来更多的提升剪切模量。由于惯性力及应变率对土体刚度的作用非常弱,所

以实际上小应变刚度同动力土体刚度在数值上是一致的。

### 1.2 设置基坑桩有限元模型单元类型与尺寸

采用有限元数值模拟方法获取基坑桩小应变模型,构建基坑桩有限元模型<sup>[7]</sup>,实现基坑桩地震的受力分析。构建有限元数值模型,其数值积分由 12 个高斯点构建,土层选择 15 个节点的三角形单元,该土层具有 4 阶位移插值,具体如图 3 所示。

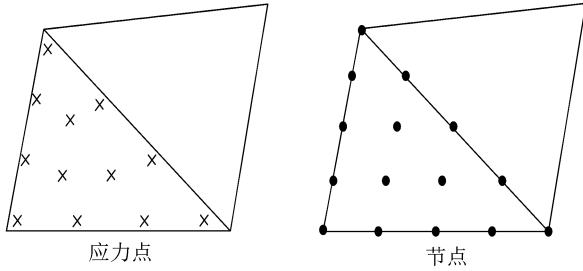


图 3 土单元应力点图和节点位置图

Fig.3 Location of nodes and stress points in the soil unit

对桩体实施仿真时,锚杆的锚固段由土工格栅替代,单个土工格栅含 5 个节点,进行轴向力的预算时采用 Newton-cotes 应力点。锚杆的自由段由点对点锚杆替代,因为点对点锚杆能负荷拉应力也能负荷压应力,根据妨碍荷载束缚的差别获得改变量<sup>[8]</sup>。由于动态荷载导致的大多是小应变,设置土体的动态刚度大于静态刚度,所以模型中的杨氏模量要比预定的稍大。为保证土体内波动散布仿真的精确度,设置土体单元的范围为:

$$Lg < \left( \frac{1}{8} \sim \frac{1}{5} \right) \lambda_{\min} \quad (1)$$

式中: $\lambda_{\min}$  表示实施获取时应该顾及的最小波长。一般情况下,地震波作用力大多聚集在 0~10 Hz,土体剪切波速的下限是 100 m/s。

### 1.3 约束基坑桩有限元模型边界条件

边界条件的约束是数值模拟的重点。由于与静力计算所用的边界相比,计算动力时边界须更远,所以必须补充内存、计算时间和大量单元。为使基坑桩有限元模型边界上的应力波不受到折射作用<sup>[9]</sup>,有限元数值模拟内应选择黏性阻尼器的吸收边界。

以吸收边界阻尼器来实现基坑桩有限元模型边界的应力波不受到折射,而后开始扩大边界。根据 Lysmer 及 Kuhlmeyer 的技术<sup>[10]</sup>,构成有限元数值模拟内吸收边界的过程中,阻尼器在  $x$  方向上吸收的垂直剪应力分量分别是:

$$\sigma_n = -C_1 p v_p \dot{u}_\lambda \quad (2)$$

$$\tau = -C_2 p v_s \dot{u}_y \quad (3)$$

式中: $p$  表示材料的密度; $v_s$  表示剪切波波速,

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)p}}; v_p \text{ 表示压缩波波速, } v_p =$$

$$\sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)p}}; C_1 \text{ 及 } C_2 \text{ 表示松弛系数,为提}$$

升吸收效率而存在,在压缩波垂直且只垂直于边界的情况下,不需要松弛,那么  $C_1 = C_2 = 1$ ;在压缩波与边界不垂直时,松弛的存在可以提升吸收边界效率,增加第二系数能够使效率更高。基于以上分析实践,当  $C_1 = 1, C_2 = 0.25$  时,基坑桩有限元模型边界上的波才能够被正确的吸收,不会引起折射导致受力分析运算结果失真<sup>[11]</sup>。

### 1.4 施加动力荷载乘子

通过动力荷载乘子对有限元数值模拟动力计算中动力荷载的输入进行求解。土体与基坑桩负载静力荷载的同时也负荷着相应的动力荷载<sup>[12]</sup>,动力荷载过大可能造成土体与基坑桩的极大毁坏。在基坑桩有限元模型内使用有限元数值模拟动力模块研究土体振动频率<sup>[13]</sup>,仿真土体同基坑桩间的关系,实现基坑桩地震冲击下受力分析。在一定时间内介质的动荷载次数不小于固有频率,获取振动频率时采用动力研究,使粘滞效应引起物理阻尼实施仿真。

### 1.5 进行基坑桩有限元模型动力时程分析

本文采用时域积分方法对基坑桩有限元模型,在地震冲击下进行动力时程分析<sup>[14]</sup>,对基坑桩在不同应力状态下的受力情况准确判断。时域积分方法中最为常见的是由 Newmark 提出的方法,通过 Newmark 方法进行逐步求解,则有:

$$\mathbf{M}\{\delta\} + \mathbf{C}\{\dot{\delta}\} + \mathbf{K}\{\delta\} + B.C. = P \quad (4)$$

其中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别表示质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $B.C.$ 表示边界项; $P$  表示时域积分结果。

式(4)内:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{M} &= \int_L m N^T N dX \\ \mathbf{C} &= \gamma \int_L N^T N dX - 2\nu \int_L m N^T \frac{\partial N}{\partial X} dX \\ \mathbf{K} &= \int_L \frac{\partial^2 N^T}{\partial X^2} EI \frac{\partial^2 N}{\partial X^2} dX + \int_L k N^T N dX - \\ &\quad \nu \gamma \int_L N^T \frac{\partial N}{\partial X} dX + \nu^2 \int_L m N^T \frac{\partial^2 N}{\partial X^2} dX \\ \mathbf{P} &= N^T P \delta(X) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$B.C.$ 表示边界项,以式(6)表示:

$B.C.=$

$$\left( N^T EI \frac{\partial^3 N}{\partial X^3} \Big|_{X=X_b^+} - \frac{\partial N^T}{\partial X} EI \frac{\partial^2 N^T}{\partial X^2} \Big|_{X=X_b^+} \right) \delta_b \quad (6)$$

式中: $X_b^\pm$ 表示模型左边界和右边界的方位; $\{\delta_b\}$ 表示边界上节点未知量。

当处于  $t \sim t + \Delta t$  的时间区域时,Newmark 方法应用如下预设,得:

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \ddot{u}_t + [(1 - \delta) \ddot{u}_t + \delta \ddot{u}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (7)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t \Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{u}_t + \alpha \ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad (8)$$

式中:若  $\alpha, \delta$  分别为  $1/4$  和  $1/2$ ,常平均加速度法作为没有约束的稳定积分方法,同 Newmark 方法具有关联性。基于此,  $\Delta t$  中的加速度为:

$$\ddot{u}_{t+s} = \frac{1}{2} (\ddot{u}_t + \ddot{u}_{t+\Delta t}) \quad (9)$$

式中:在  $t + \Delta t$  时间段的位移能够达到其运动方程的要求,表示为:

$$M \ddot{u}_{t+\Delta t} + C \dot{u}_{t+\Delta t} + K u_{t+\Delta t} = P_{t+\Delta t} \quad (10)$$

为实现上式,需要经由式(8)获取:

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (u_{t+\Delta t} - u_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u}_t - \left( \frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \quad (11)$$

在式(7)内融入式(11),得到的结果添加到式(10)中,获取的计算  $u_{t+\Delta t}$  的两步递推公式是通过  $u_t, \dot{u}_t$  和  $\ddot{u}_t$  得到的,表示为:

$$\begin{aligned} \left( K + \frac{1}{\alpha \Delta t^2} M + \frac{\delta}{\alpha \Delta t} C \right) u_{t+\Delta t} = P_{t+\Delta t} + \\ M \left[ \frac{1}{\alpha \Delta t^2} u_t + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u}_t + \left( \frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \right] + \\ C \left[ \frac{\delta}{\alpha \Delta t} u_t + \left( \frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{u}_t + \left( \frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \Delta t \ddot{u}_t \right] \end{aligned} \quad (12)$$

最后,对  $\ddot{u}_{t+\Delta t}$  和  $\dot{u}_{t+\Delta t}$  实施运算。

## 2 数值模拟分析

为了验证本论述提出的基坑桩受力分析模型的有效性以及能否预测地震作用后的基坑变形情况,本论述应用分析模型分别对地震冲击下的基坑应力分布、地震冲击前后桩体水平位移差值、剪切模量和阻尼比以及不同力作用下基坑桩身弯曲度、轴力、剪力、变形位移等进行对比分析,分析结果见下文描述。

分析图 4 可知本论述模型分析得到地震冲击后基坑应力分布情况是:开端的边界应力决定其速度,

荷载造成平均边界应力有所提升,添加吸收边界可以阻止平均应力上升的部分被吸收,从而形成模型边界的运动。提升本论述所述模型荷载,获取新的应力分布,底部固定边界会吸收平均应力上升的部分。

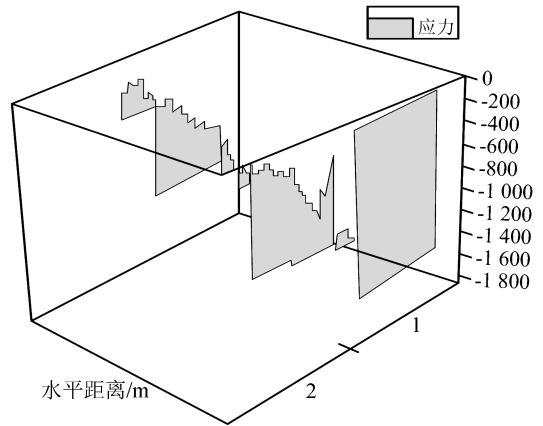


图 4 地震冲击后基坑应力分布图

Fig.4 Stress distribution in foundation pit after earthquake shock

分析图 5 可知:随着剪应变的变化,阻尼比和模量比均发生了非线性变化,且该数值波动较大。在此变化趋势基础上,进行不同作用力下基坑桩身弯矩对比、基坑桩身轴力对比、基坑桩体变形位移对比以及基坑桩身剪力对比的分析。

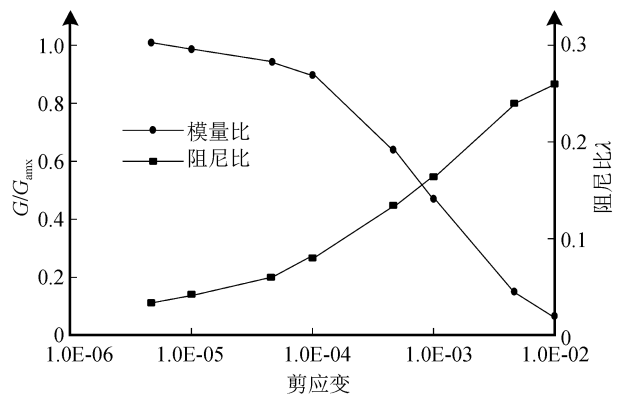


图 5 剪应变幅值导致剪切模量和阻尼比变化曲线图

Fig.5 Change curves of shear modulus and damping ratio with shear strain amplitude

分析图 6 可知,两种作用力下桩身弯矩的最大值几乎一样,这说明拉力对基坑桩的桩身弯矩没有影响,地震冲击下,受压部分有明显的变化,单位受力值提高了  $46 \text{ kNm/m}$ 。这说明,压力对基坑桩身的影响远大于拉力,所以可知地震冲击对基坑桩身具有较大的破坏力。

由图 7 可知:地震冲击下,本论述模型分析得出不同力作用下基坑桩体增加了 133 kN/m 的压力。轴力最大的点依旧在基底处不变。这说明地震冲击

对基坑桩身轴力方向影响也较大,所以在地震中对桩体的轴力方向的保护与加固是必不可少的。

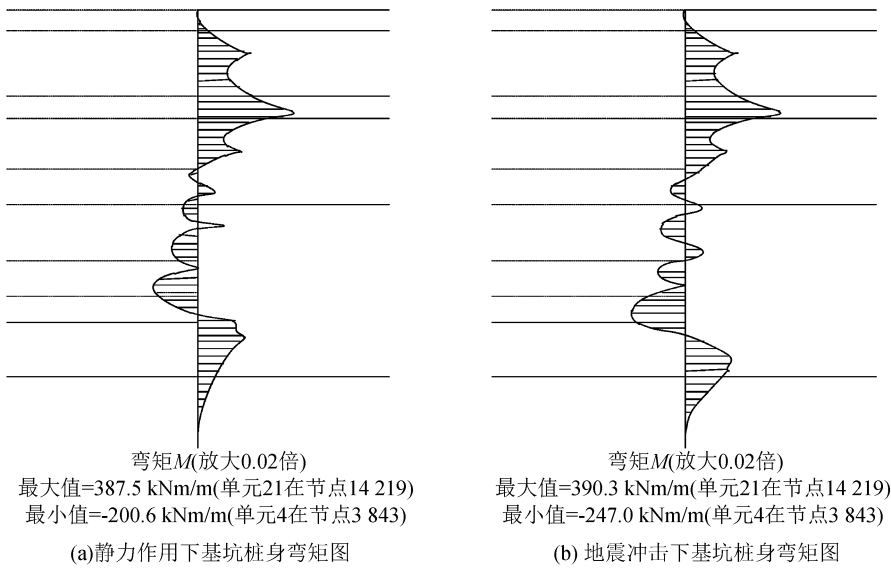


图 6 不同的力作用下基坑桩身弯矩对比图

Fig.6 Contrast diagram of bending moment of pile body under the action of different force

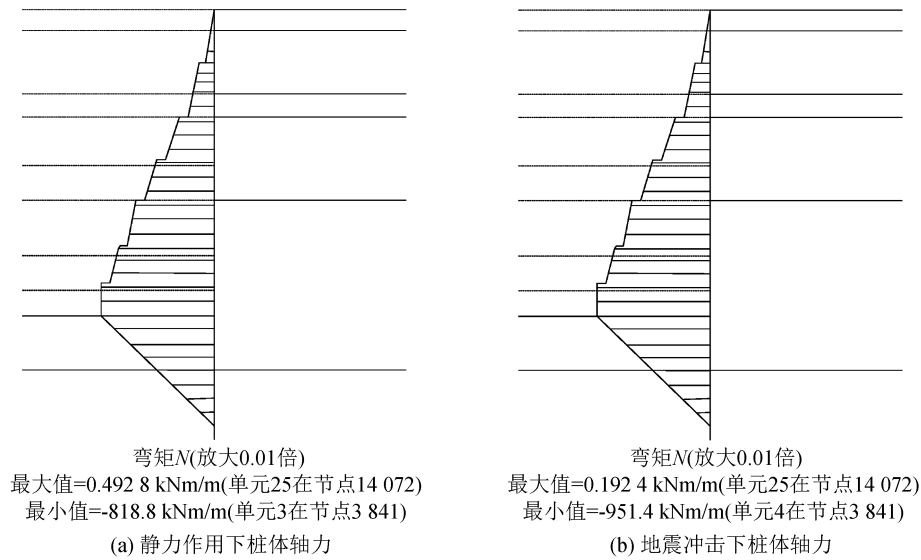


图 7 不同力作用下基坑桩身轴力对比图

Fig.7 Contrast diagram of axial force of pile body under the action of different force

分析图 8 可知:地震冲击下,本论述模型分析得出不同力作用下基坑桩身剪力变化不明显,最大值和最小值分别上升 23 kN/m 和 33 kN/m。

分析图 9 可知:地震冲击下,本论述模型得出不同力作用下基坑桩体变形位移较为明显。

分析图 10 可知利用本论述模型完成基坑施工后,对其重复进行仿真地震冲击,基底变形极限约 0.07 m,桩体深度从深至浅为波浪曲线式逐渐提升;

基坑中部区域位移最明显,这是由约束条件决定的地震冲击下模型的变形,并和材料阻尼呈线性关系。静力作用下地震冲击时桩体位移提升0.095 m,桩体水平位移差值的左右峰值点对应的桩体深度为-15 m和-30 m区域。

### 3 结论

本论述提出基于有限元数值模拟的基坑桩地震

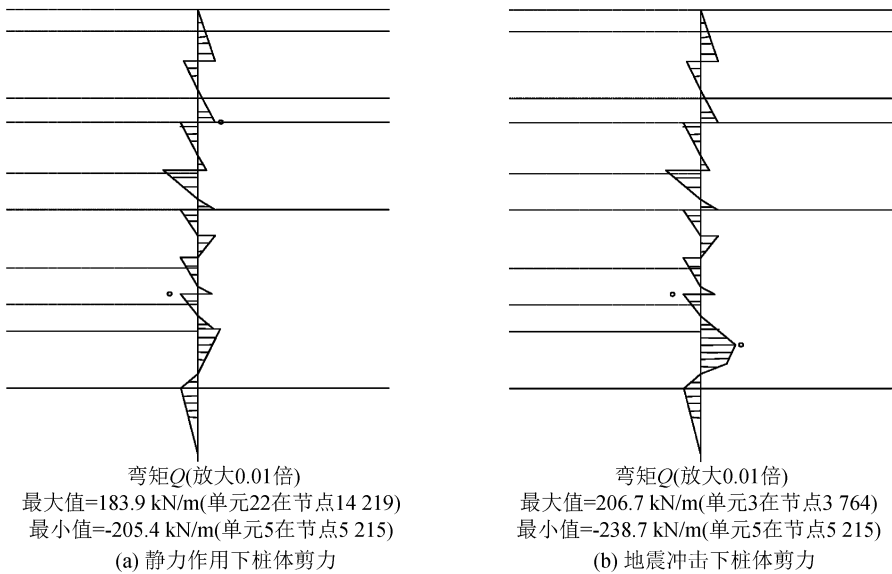


图 8 不同的力作用下基坑桩身剪力对比图

Fig.8 Contrast diagram of shear force of pile body under the action of different force

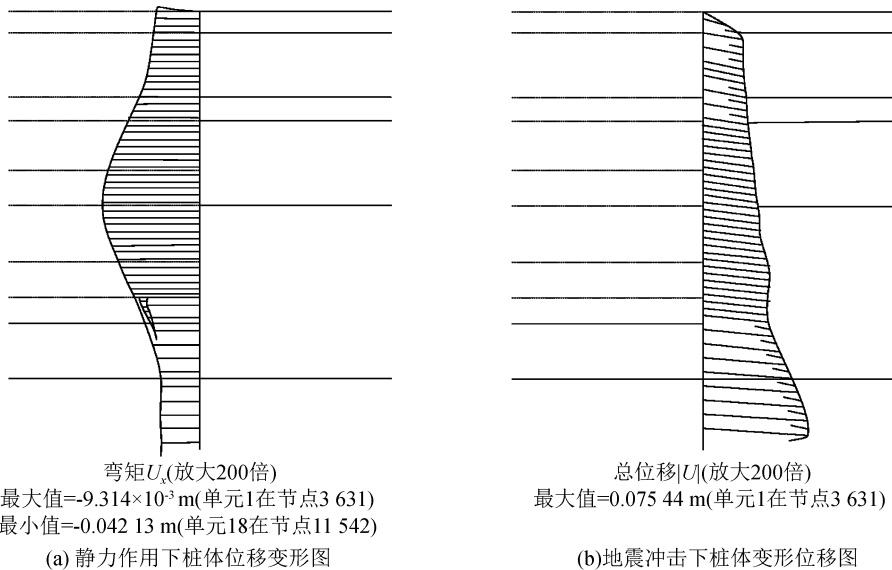


图 9 不同的力作用下基坑桩体变形位移对比图

Fig.9 Contrast diagram of deformation and displacement of pile body under the action of different force

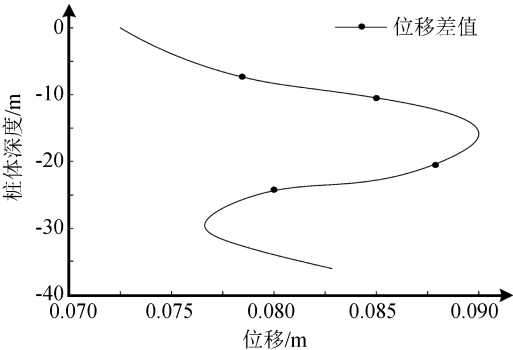


图 10 地震冲击前后桩体水平位移差值图

Fig.10 The difference of horizontal displacements before and after earthquake shock

冲击下受力分析模型。基坑桩小应变模型可以仿真应力变化时基坑桩模量的改变,更准确的体现了基坑桩的真实状态;通过采用有限元数值模拟方法获取基坑桩小应变模型,构建基坑桩有限元模型,利用 Newmark 方法对其进行动力时程分析,实现基坑桩地震波动下受力情况的高精度分析。实验证明应用本模型能够有效、准确的对地震冲击下的基坑应力分布、基坑桩身弯矩、变形位移以及桩体水平位移差值等进行全面分析。说明本论述的模型对于学术及应用具有积极作用,不仅能处理施工过程中存在的问题,还可以提高基坑工程施工过程中的安全性。

## 参考文献(References)

- [1] 文韬,张乔根,赵军平,等.特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J].电力工程技术,2017,36(1):30-33.  
WEN Tao,ZHANG Qiaogen,ZHAO Junping,et al.Application of On-site Standard Lightning Impulse Test Technology for UHV GIS Equipment[J].Electrical Power Engineering Technology,2017,36(1):30-33.
- [2] 胡宗达,杨长春,矣雷阳,等.基于非限制性结构的地震动加速度计仿真设计[J].计算机仿真,2016,33(1):127-132.  
HU Zongda,YANG Changchun,YI Leiyang,et al.Seismic Accelerometer Simulation Design Based on Unconstrained Structure[J].Computer Simulation,2016,33(1):127-132.
- [3] 薛光桥.深基坑双排桩结构受力变形机理及其计算模型研究[J].铁道标准设计,2016,60(7):116-120.  
XUE Guangqiao. Research on Mechanism and Computation Model of Deep Foundation Pit Double-row Pile Structure[J]. Railway Standard Design,2016,60(7):116-120.
- [4] 罗川,占昌宝,楼云锋,等.地震激励下桩-土非线性耦合作用对桩基动力响应特性的影响[J].振动与冲击,2017,36(3):20-26.  
LUO Chuan,ZHAN Changbao,LOU Yunfeng,et al.Effects of Pile-soil Nonlinear Coupling Actions on Dynamic Response Features of Pile Foundation under Earthquake[J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(3):20-26.
- [5] 董必昌,付绍卿,张哲.双向地震作用下的双排桩边坡参数敏感性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(1):17-21.  
DONG Bichang,FU Shaoqing,ZHANG Zhe,et al.Parameters Sensitivity Analysis of Slope with Double-rows Piles under Bilateral Seismic Actions[J].Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2017,41(1):17-21.
- [6] 冯克义,蒋奇,李君超,等.深基坑全封闭防水技术[J].水利水电技术,2015,46(9):56-57.  
FENG Keyi,JIANG Qi,LI Junchao,et al.Full-enclosed Water Proof Design of Deep Foundation Pit[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2015,46(9):56-57.
- [7] 丁洪元,昌钰,陈斌.软土深基坑双排桩支护结构的影响因素分析[J].长江科学院院报,2015,32(5):105-109.  
DING Hongyuan,CHANG Yu,CHEN Bin,et al.Factors Affecting Double-row Piles in Deep Soft Soil Foundation[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2015,32(5):105-109.
- [8] 陈兆强.典型溶蚀地质的锚碇深基坑支护施工[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2014,14(3):4-7.  
CHEN Zhaoqiang. Typical Karst Geological Anchor Deep Foundation Pit Support Construction[J].Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power,2014,14(3):4-7.
- [9] MA C,WANG X G,HU B,et al.Numerical Simulation Analysis of Isolation Pile-Steel Shotcrete Combined Support of Deep Foundation Pit Excavation[J].Applied Mechanics & Materials,2014,638-640(1):507-511.
- [10] DAI W K,LIANG L,XIN Q M.Frost Heaving Model Test and Response Analysis of Pile-Anchor Foundation Pit in Cohesive Soil Area[J].Journal of Northeastern University,2017,38(12):1785-1789.
- [11] 田青芸,马东辉,王威.地震作用下建筑物上部楼层倾覆模式安全距离研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(9):17-24.  
TIAN Qingyun,MA Donghui,WANG Wei,et al.Study on Safety Distance of Upper Structure Toppling for Buildings under Earthquake[J].Journal of Safety Science and Technology,2014,10(9):17-24.
- [12] 金波.预应力型钢组合内支撑在深基坑工程中的应用[J].建筑技术,2016,47(4):328-331.  
JIN Bo.Application of Prestressed Steel Composite Inner Supports in Deep Foundation Pit Engineering[J].Architecture Technology,2016,47(4):328-331.
- [13] 索文斌,程刚,卢毅,等.深基坑支护桩布里渊光时域分布式监测方法研究[J].高校地质学报,2016,22(4):724-732.  
SUO Wenbin,CHENG Gang,LU Yi,et al.Study on Distributed Monitoring Method of Deep Foundation Pit Retaining Pile Based on the Brillouin Optical Time Domain Technology[J].Geological Journal of China Universities,2016,22(4):724-732.
- [14] LIANG L.Monitoring and Numerical Simulation of Structure Behavior of Supporting Piles in a Deep Foundation pit[J].Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2015,20(1):245-257.
- [15] 张伟光,杨长德,王鹏.基于地震波法的底板破坏区域探测技术及应用[J].中国安全生产科学技术,2016,12(6):77-81.  
ZHANG Weiguang,YANG Changde,WANG Peng.Detection Technology of Floor Damage Area Based on Seismic Wave Method and Its Application[J].Journal of Safety Science and Technology,2016,12(6):77-81.