

张斌伟,严松宏.强震状态下黄土中桩基动力性状分析[J].地震工程学报,2018,40(3):473-479.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.473

ZHANG Binwei, YAN Songhong. Dynamic Performance of Pile Foundation in Loess During Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 473-479. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.473

# 强震状态下黄土中桩基动力性状分析

张斌伟<sup>1,2</sup>, 严松宏<sup>2</sup>

(1. 陇东学院土木工程学院, 甘肃 庆阳 74500; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 传统通过  $p$ - $y$  曲线法分析强震状态下黄土中桩基动力性状时未进行桩基结构模拟, 获取的强震状态下黄土中桩基动力的相关动力参数不准确。本文提出新的强震状态下黄土中桩基动力性状分析方法, 依据 HS 硬化模型设计 HSS 本构模型, 通过模型获取强震状态下黄土中桩基动力的相关参数, 以此为基础采用 PLAXIS 软件构建黄土中桩基有限元模型; 通过两种模型从耦合荷载作用下的桩基桩身水平位移响应、桩身内力响应两方面对强震状态下黄土桩基动力性状展开实验分析。实验结果表明, 所提方法可对强震状态下黄土中桩基动力性状进行准确分析。

**关键词:** 强震状态; 黄土中桩基; HSS 本构模型; 有限元模型; 相关参数; 动力性状竖向荷载; 水平荷载

中图分类号: TU433; U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0473-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.473

## Dynamic Performance of Pile Foundation in Loess During Strong Earthquakes

ZHANG Binwei<sup>1,2</sup>, YAN Songhong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, Gansu, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** The traditional  $p$ - $y$  curve method for analyzing the dynamic behavior of pile foundations in loess during strong earthquakes does not simulate the pile foundation structure, so the relevant dynamic parameters of the pile foundation in loess are inaccurate. In this paper, we present a new dynamic analysis method for pile foundations in loess during strong earthquakes. We designed a hardening soil-small (HSS) constitutive model based on the hardening soil (HS) model, and obtained the related parameters of the pile foundation in loess during strong earthquakes through the constitutive model. Then, using PLAXIS software, we constructed a finite element model of the pile foundation in loess. Based on these two models, we conducted experiments on pile foundations during strong earthquakes to analyze their horizontal displacement responses and the internal forces in the pile body under the coupled load. The experimental results show that the pro-

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 2015 年甘肃省自然科学基金和甘肃省高等学校科研基金“陇东深厚黄土地基桩-土作用理论分析及试验研究”  
(1506RJZM322, 2015A-151)

作者简介: 张斌伟(1981—), 男, 甘肃会宁人, 在读博士, 副教授, 研究方向: 岩土极限分析理论与地下工程抗震。

E-mail: zbw3000@163.com。

posed method can accurately analyze the dynamic characteristics of pile foundations in loess during strong earthquakes.

**Key words:** action of strong earthquake; pile foundation in loess; HSS constitutive model; finite element model; related parameters; dynamic performance; vertical load; horizontal load

0 引言

我国华北、西北地区为黄土土质,其中大部分是湿陷性黄土,且这一地区地震灾害频发,所以对于建筑物抗震性能的要求十分严格。根据以往地震中建筑物抗震性能的研究,地震多发区域以及高层建筑物大多采用基桩作为建筑物的基础,这主要因为基桩具有良好的抗震性能<sup>[1]</sup>。为更加全面了解桩基在黄土地区的抗震性能,对强震状态下黄土中桩基动力的性状进行分析,对提高黄土地区建筑的抗震稳定性具有重要意义。

文献[2]研究了湛江组结构性黏土中单桩水平承载性状,在水平荷载作用下湛江组结构性黏土中具有相同材质、相同桩径的单桩,其水平临界荷载  $H_{cr}$  和极限承载力  $H_u$  与入土桩长呈正相关关系,桩身弯矩、剪力和桩侧土抗力的最大值均随着入土桩长的增加而增大,但该方法只能分析强震状态下黄土中单桩的水平承载力,不能研究总体桩基的水平位移响应,无法准确获取强震状态下黄土中桩基动力的相关动力参数。文献[3]为了研究黄土地区成孔方式对桩基承载特性的影响,依托永寿至咸阳高速公路工程,对两个试验区的 4 根试桩进行了静载试验,分析研究了不同成孔方式下桩基荷载传递规律,但其侧重分析冲孔形式对黄土中桩基承载力的干扰,具有一定的局限性,不能实现对黄土中桩基动力性状的准确分析。文献[4]基于黄土非均匀湿陷发生机理和纯摩擦桩基的受力特点,结合实际工程,对现场试桩采用常规桩基浸水试验和控制变量法桩基试验,对非均匀湿陷条件下桥梁桩基负摩阻力的受力特性进行了研究,但这并不适用于强震状态下的黄土中桩基动力形状的研究,无法得到准确分析结果。文献[5]采用  $p$ - $y$  曲线法对砂土与黏土

中侧向受荷桩进行非线性分析。对于砂土与黏土采用不同的  $p$ - $y$  曲线模型,并用  $m$  值和统一极限抗力作为模型参数。通过有限差分法与迭代方式进行计算,迭代过程中将土体变形分为弹性区与塑性区,建立全新的计算模型。利用 Fortran 语言编程,分别对黏土与砂土中侧向受荷桩的受力性状进行分析计算。虽然该方法有一定的实用性,但在分析方面缺乏准确性。针对这些问题,本文提出新的强震状态下黄土中桩基动力性状分析方法,采用黄土中桩基有限元模型以及 HSS 本构模型获取强震状态下黄土中桩基动力相关参数,基于相关参数从耦合荷载作用下的桩基桩身水平位移响应、桩身内力响应两方面分析强震状态下黄土桩基动力性状展开实验分析,实现对强震状态下黄土中桩基动力性状的准确分析。

1 强震状态下黄土中桩基动力性状分析

1.1 黄土土体参数与 HSS 本构模型选择

文章对黄土中桩基动力的性状进行分析,使用的黄土土体强度具体参数如表 1 所列。

表 1 土体强度参数设置

| Table 1 Setting of soil strength parameters |         |               |                                |
|---------------------------------------------|---------|---------------|--------------------------------|
| 变形模量 $E_0$ /MPa                             | 黏聚力/kPa | 摩擦角 $\varphi$ | $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> ) |
| 19                                          | 6       | 21            | 17                             |

基于 HS 硬化模型设计小应变硬化模型(HSS 本构模型)<sup>[6]</sup>,引用性能较优的 HSS 本构模型对强震状态下黄土中的桩基动力进行研究,该模型在注重土体受荷经历的同时,兼顾桩基刚度的应变相关性<sup>[7]</sup>。基于以往的研究,采用勘测报告对 HSS 本构模型的相关参数进行设定<sup>[8]</sup>,详细参数、参数意义和取值方法如表 2 所列。

表 2 HSS 本构模型的参数、参数意义和取值方法

| Table 2 Parameters, parameters' meanings, and value obtained method of HSS constitutive model |                                                        |                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 土体参数                                                                                          | 意义                                                     | 取值                                                               |
| $E_{50}^{\text{ref}}$                                                                         | 主加载割线模量                                                | $E_{50}^{\text{ref}} = (1 - 2)E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ (黏性土) |
| $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$                                                                  | 卸荷再加载模量(工程应变 $\epsilon \approx 10^{-3} \sim 10^{-2}$ ) | $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4 \sim 6E_{50}^{\text{ref}}$ (黏性土) |
| $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$                                                                 | 固结试验的切线模量                                              | $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = E_s^{1-2}$ (黏性土固结试验值)             |
| $G_0$                                                                                         | 参考初始剪切模量                                               | $G_0^{\text{ref}} = (1 \sim 2)E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$        |
| $\gamma_{0.7}$                                                                                | 阈值剪应变                                                  | $(1 \sim 2)e^{-4}$                                               |
| $m$                                                                                           | 幂指数                                                    | 黏性土取 0.7~0.9                                                     |

通过表 2 的 HSS 本构模型参数取值方法,获取其详细的取值(表 3)。

表 3 HSS 本构模型取值

| Table 3 Values of HSS constitutive model |         |
|------------------------------------------|---------|
| $E_0/\text{MPa}$                         | 19      |
| $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$         | 9       |
| $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | 9       |
| $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$  | 29      |
| $m$                                      | 0.7     |
| $\gamma_{0.7}$                           | 0.000 2 |
| $R_{\text{inter}}$                       | 0.8     |
| $G_0/\text{MPa}$                         | 89      |

1.2 构建黄土中桩基有限元模型

通过有限元软件 PLAXIS 中的 HSS 本构模型获取强震状态下黄土中桩基动力的相关参数<sup>[9]</sup>,根据这些参数实现对黄土中桩基动力性状的准确分析。通过对底层与桩基进行特殊设定,使得计算简便并获取明显的特征。详细的设置为<sup>[10]</sup>:(1)令地层均质水平;(2)不考虑地表以下水的干扰;(3)令圆桩以板桩的形式存在,在平面应变模型的基础上实现;(4)为解决由桩土表面粗糙率差异引起的桩土相互作用降低的问题,设定 PLAXIS 软件中的强度折减因子  $R_{\text{inter}}=0.9$  使其符合界面的要求<sup>[11]</sup>。文章对桩基结构的仿真研究是基于 PLAXIS 软件的板单元进行的。图 1 为实施重复荷载作用后基桩的有限元模型图,图 2 为有限元网格划分图,其中桩身的物理条件如表 4 所列。在图 1 描述的模型中,自由的界面存在于模型表面,横向与纵向的位移约束存在于模型底部,横向的不变约束存在于模型侧面。将  $D=1.0\text{ m}$  作为桩体的半径,18 m 作为桩的长度,使真实的工程状况符合本文设定的计算参数<sup>[12]</sup>。由

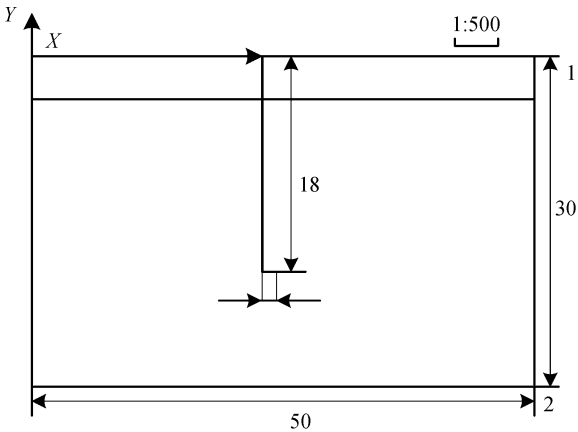


图 1 桩基有限元模型示意图(单位:m)

Fig.1 Sketch map of the finite element model of pile foundation (Unit: m)

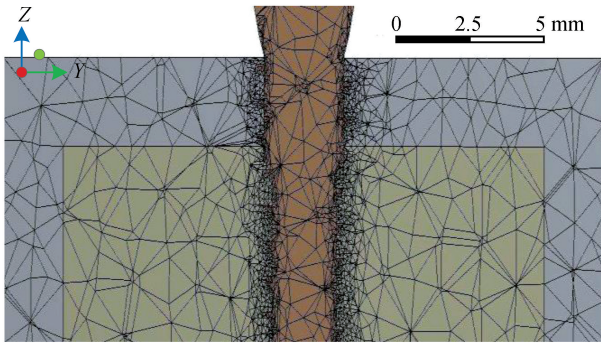


图 2 有限元网格划分图(单位:mm)

Fig.2 Finite element meshing (Unit: mm)

表 4 桩身物理条件

| Table 4 Physical condition of pile body |                         |                          |                    |                    |
|-----------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| 弹性模量<br>$E_p/\text{MPa}$                | 抗弯刚度<br>$EI/\text{kPa}$ | 轴向刚度<br>$E_A/\text{kPa}$ | 桩长<br>$L/\text{m}$ | 桩土刚度比<br>$E_p/E_0$ |
| $3 \times 10^4$                         | $1.362 \times 10^6$     | $2.245 \times 10^7$      | 18                 | 1 100              |

于强震状态下的黄土桩基的活动范围高达桩径大小的 10 倍之多,设定深度 30 m、宽度 50 m 为仿真研究的展开领域。强震过程中振动波模型依靠底部边界、左右边界进行消除。将模型中待计算的区域划分成网格状<sup>[13]</sup>,关键要提高网格的分布密度。

1.3 荷载特性与参数设置

在分析强震状态下的黄土中桩基动力性状时,用存在规律的双向简谐波荷载代替存在难度的重复水平荷载作用在桩基上部<sup>[14]</sup>,详细的计算方法见式(1):

$$F(t) = F \sin(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

式中:振幅用  $F$  表示,设定  $F=200\text{ kN}$ ;荷载频率用  $\omega$  表示, $\omega=2\text{ Hz}$ ;荷载持续时间用  $t$  表示, $t=10\text{ s}$ ;  $\varphi$  为初始相位角, $\varphi=0$ 。

基于 1.1 小节中各参数设置与设置方法参考桩基有限元模型,获取模型中其他参数的设置<sup>[15]</sup>:桩体弹性模量  $E_p=3 \times 10^4\text{ MPa}$ ,土体变形模量  $E_0=30\text{ MPa}$ ,100 kN、200 kN、300 kN 是竖向荷载的取值,双向简谐波荷载即水平荷载。

本文基于黄土中桩基有限元模型和 HSS 本构模型,获取强震状态下黄土中桩基动力的相关参数,根据这些参数,从耦合荷载作用下的桩基桩身水平位移响应、桩身内力响应两方面分析强震状态下黄土桩基动力性状。

2 实验分析

2.1 耦合荷载作用下桩身水平位移的响应

实验基于黄土中桩基有限元模型和 HSS 本构模型,设置 4 种大小的桩基竖向荷载值的方式,验证

不同大小荷载对桩基桩身水平位移的影响,0、100 kN、200 kN、300 kN 为设定的 4 种荷载值。获

取强震状态下黄土单桩基桩顶水平位移折线图,如图 3 所示。

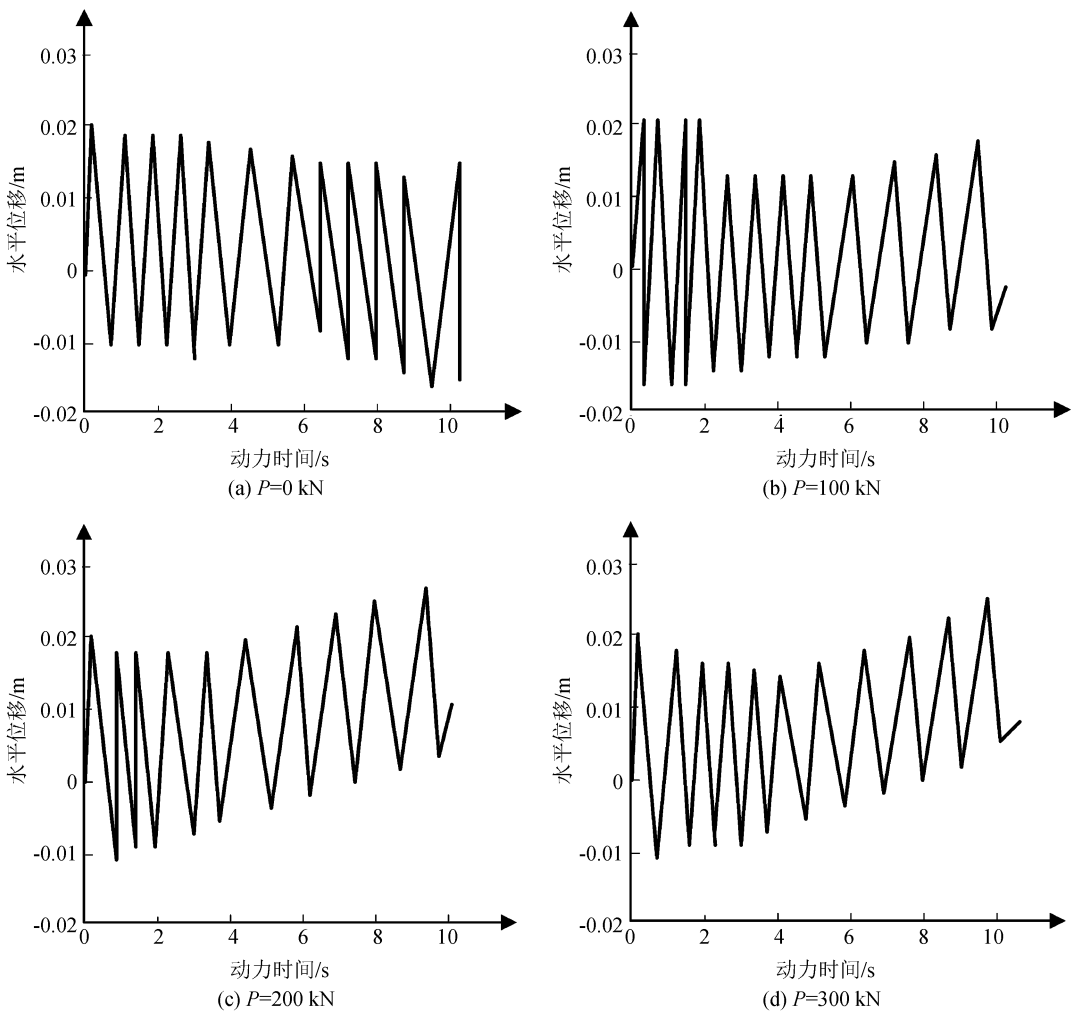


图 3 不同竖向力作用下桩顶的位移时程曲线

Fig.3 Displacement time history curves of pile top under the action of different vertical forces

分析图 3 能够看出,桩基的侧向位移受到来自竖向荷载改变的干扰,且表现明显。竖向荷载对桩基侧向位移干扰最大时  $P=200\text{ kN}$ ,如图 3(c)所示桩基正向侧的位移总量持续提高。竖向荷载对桩基侧向位移干扰最小时  $P=100\text{ kN}$ ,一方面是因为竖向荷载采用轴心荷载的方式在水平荷载之前进行作用;另一方面是因为  $P=100\text{ kN}$  时,竖向荷载处于较小范围,实施重复水平荷载对桩基的水平运动产生束缚,这是由于偏心距与偏心获取的二阶弯矩值不高,导致最终得到的水平向位移在 4 种竖向荷载数值下最小。

在此基础上,将  $t$  设为  $0.2\text{ s}$ ,4 种数值竖向荷载施加压力下,强震状态下黄土桩基的水平位移状况如图 4 所示。

分析图 4(a)~(d)中的水平位移的极值能够看

出,桩基上部是受水平向变形最大的部分,向桩基底部蔓延呈下降趋势,当桩身长度是  $10\text{ m}$  时相应的水平位移维持在  $0$  上下。桩身的水平位移最大值发生减小现象是在竖向荷载是  $100\text{ kN}$  的情况下,该情况表明,水平应力在竖向荷载极低时受到干扰,将其部分消除,相应的侧移呈下降趋势,相反,竖向力的增加会引发水平向产生大幅度的加挠曲线,因而桩身水平位移逐步上升。

通过以上实验能够看出,本文方法得到的规律与实际规律相符,能够从耦合荷载作用下桩身水平位移的响应方面实现对强震状态下黄土中桩基动力性状的有效分析。

2.2 耦合荷载作用下桩身内力的响应

图 5(a)~(d)为强震状态下黄土中 4 种竖向荷载的桩基剪力排列情况,此时满足  $t=0.2\text{ s}$ ,且位于

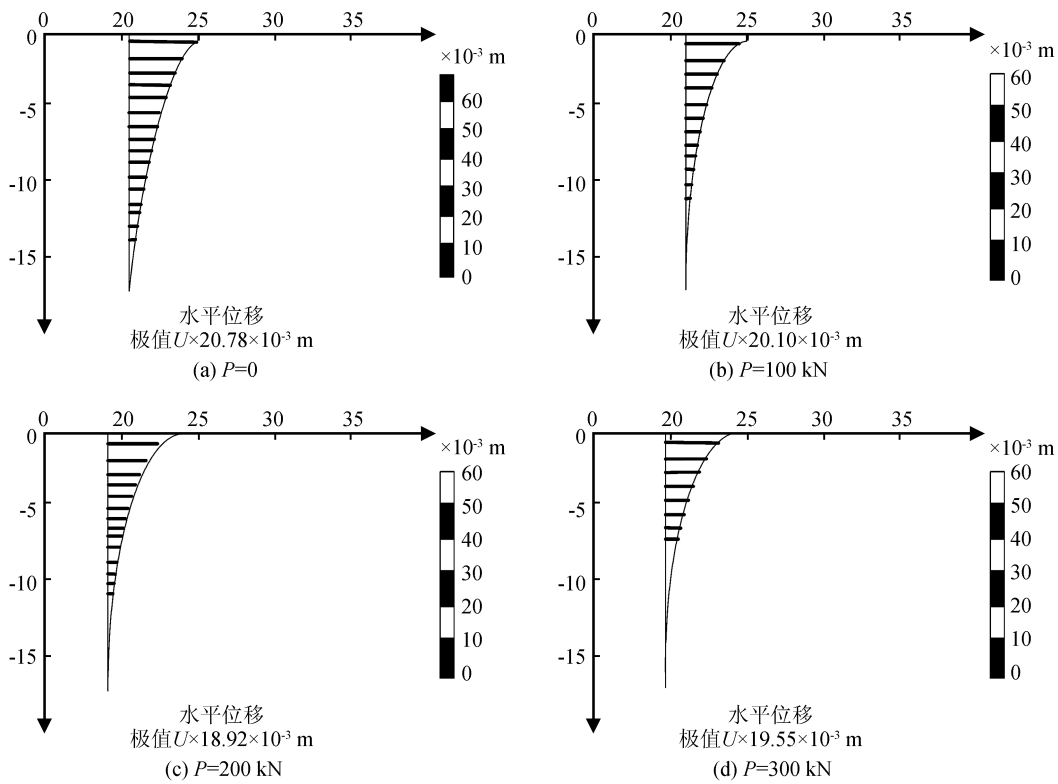


图 4 不同竖向力作用下桩身水平位移分布图 ( $t=0.2 \text{ s}$ )

Fig.4 Horizontal displacement distribution of pile body under the action of different vertical forces ( $t=0.2 \text{ s}$ )

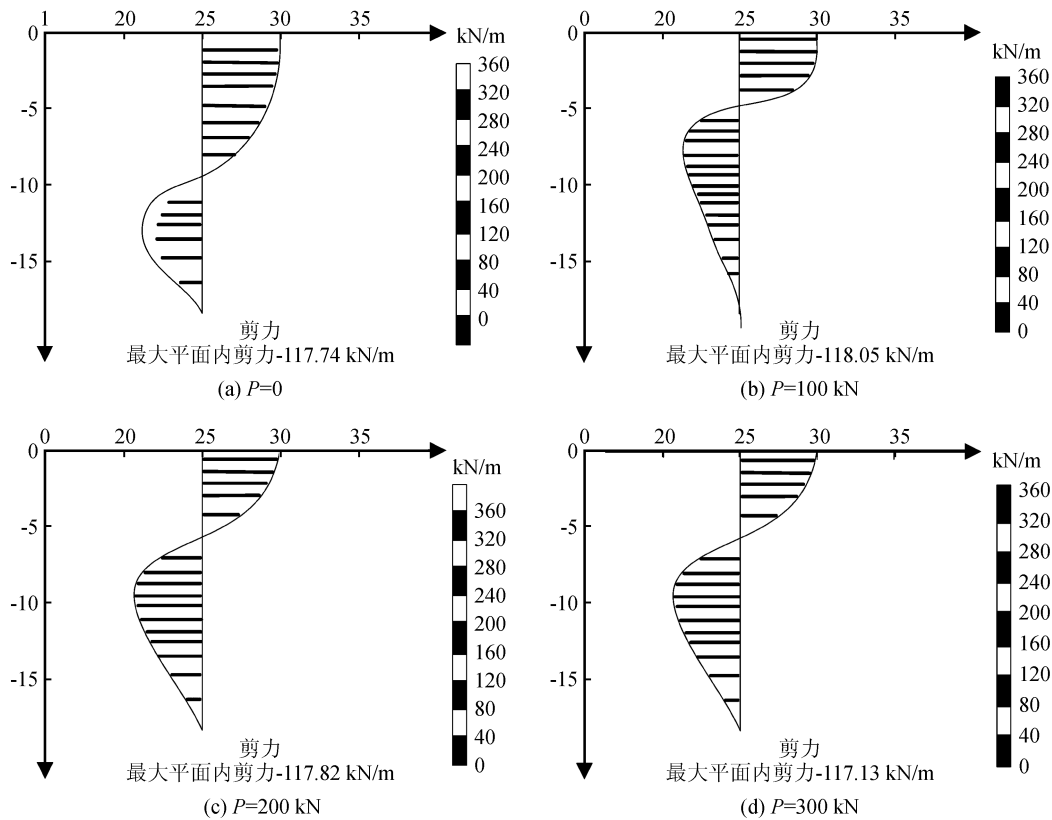


图 5 不同竖向力作用下的桩身剪力图

Fig.5 Shear force of pile body under the action of different vertical forces



首个水平荷载循环周期,并且水平位移达到上限。分析图 5(a)~(d)可知,桩基上部出现剪力值的极值,桩身深度与桩身的剪力值成反比例关系,剪力值为 0 时桩身约是 10 m;若桩身的深度不断上涨则产生相反的剪力作用,剪力的分布规律为增大—减小模式,桩底部分稳定在 0 上下。通过上述分析能够看出,桩基剪力的排列规律不会受到竖向荷载的干扰。

图 6(a)~(d)描述了桩基发生弯矩的分布情

况,弯矩值位于桩基的上部时是 0,桩基深度与弯矩值成正比例关系。桩基深度是 10 m 时相应的剪力值降低为 0,则相应的弯矩值最大,桩基深度的上升使得弯矩值下降,直至下降为 0 时,所处的位置为桩基的底部。基于以往对材料力学的研究,弯矩值与剪力值的变化状况相同,所以该变化状况足以证明土层至地下 10 m 位置的桩周土层对于土抗力至关重要。

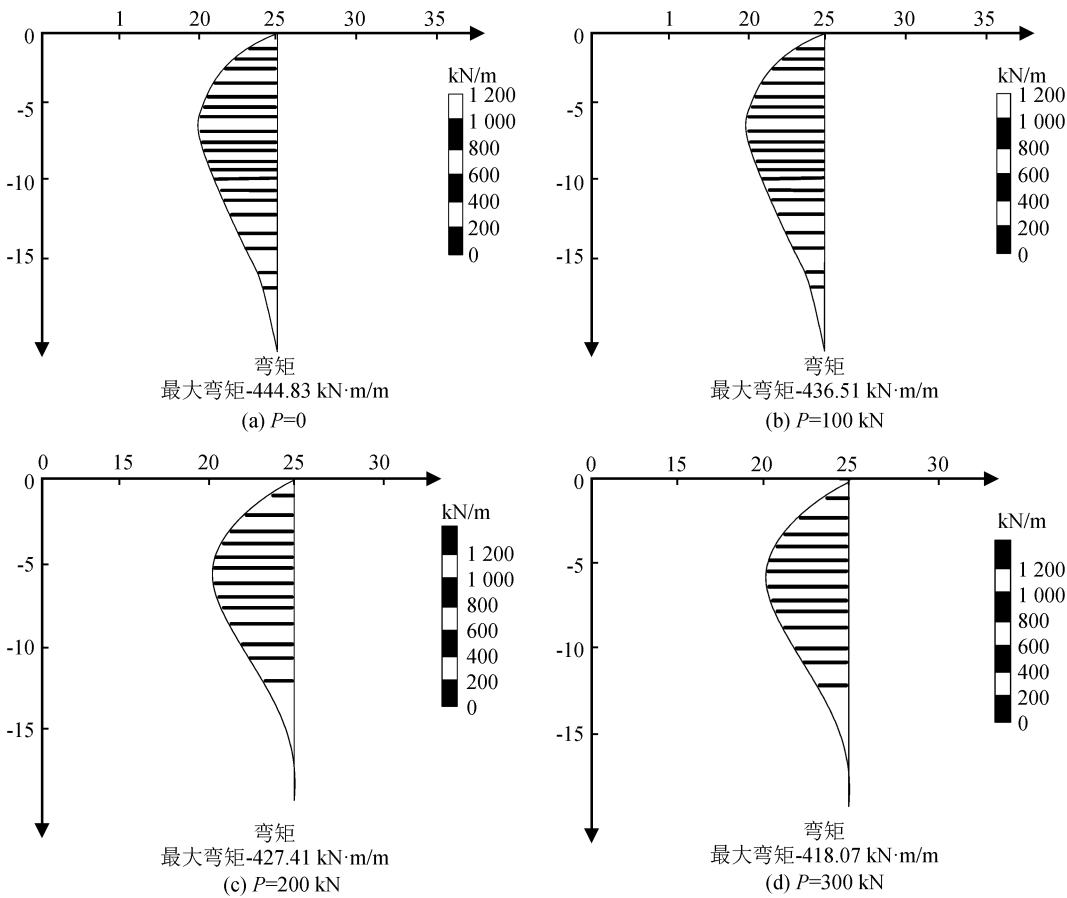


图 6 不同竖向力作用下的桩身弯矩图

Fig.6 Bending moment of pile body under the action of different vertical forces

表 5 描述了强震状态下黄土中 4 种竖向荷载作用获取的剪力值与弯矩值。从弯矩值角度分析,随着竖向荷载值的增加,桩基桩身的弯矩值逐渐降低,

但降低的幅度不大。

桩周土的抗力可以通过  $t=10\text{ s}$  时的桩身剪力值进行表现,因为  $t=10\text{ s}$  时是末次卸载为 0 的时

表 5 不同时刻不同竖向荷载下的剪力值和弯矩

Table 5 Shear force and bending moment at different moments under different vertical loads

| 时刻               | 项目                                        | 竖向荷载/kN |         |         |         |
|------------------|-------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                  |                                           | $P=0$   | $P=100$ | $P=200$ | $P=300$ |
| $t=0.2\text{ s}$ | 剪力值/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )     | -106.63 | -107.04 | -106.71 | -106.02 |
|                  | 弯矩值/( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ) | -433.72 | -425.4  | -416.3  | -407.06 |
| $t=10\text{ s}$  | 剪力值/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )     | -16.34  | 14.64   | -27.3   | -19     |
|                  | 弯矩值/( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ) | 50.35   | 34.26   | -34.05  | -67.04  |

间点。分析表 5 不同时刻不同竖向荷载下的剪力值和弯矩值状况,当竖向荷载为 100 kN 时抵消了一定的水平应力,此时获取的剪力值低于竖向荷载为 0 的剪力值,相应的桩周土抗力达到下限;竖向荷载作用与剪力值成正比例关系,则说明此时的桩周土抗力呈上升趋势。

通过以上实验能够看出其所得到的规律与实际规律相符,本文方法能够从桩身内力响应方面实现对强震状态下黄土中桩基动力性状的有效分析。

### 3 结论

文章提出的强震状态下黄土中桩基动力性状分析方法,基于 HS 硬化模型设计小应变硬化模型(HSS 本构模型),采用 HSS 本构模型对强震状态下黄土中的桩基动力进行研究,该模型在注重土体受荷经历的同时,兼顾桩基刚度的应变相关性,并采用勘测报告设置 HSS 本构模型的相关参数;通过有限元软件 PLAXIS 中的 HSS 本构模型获取强震状态下黄土中桩基动力的相关参数;分析强震状态下黄土中桩基的动力性状时,用存在规律的双向简谐波荷载代替存在难度的重复水平载荷作用在桩基上部;最终采用黄土中桩基有限元模型以及 HSS 本构模型获取相关参数,根据这些参数分析强震状态下黄土桩基动力性状并展开实验研究。实验结果表明,本文方法在耦合荷载作用下桩身水平位移的响应、桩身内力响应两方面所得到的规律与实际规律相符,本文方法能够从耦合荷载作用下桩身水平位移的响应、桩身内力响应两方面实现对强震状态下黄土中桩基动力性状的有效分析,有助于更加全面、准确地了解黄土中桩基的抗震性能,便于有针对性的提高黄土地区建筑的抗震稳定性,具有一定的实用价值。

### 参考文献(References)

[1] 蔺鹏臻,武发辉,杨子江.考虑边坡效应的桥梁桩基受力分析[J].中国铁道科学,2016,37(4):54-60.  
LIN Pengzhen, WU Fahui, YANG Zijiang. Mechanics Analysis of Bridge Pile Foundation Considering Slope Effect[J]. Mechanics Analysis of Bridge Pile Foundation Considering Slope Effect, 2016, 37(4): 54-60.

[2] 汤斌,郭凡夫,沈建华.湛江组结构性黏土中单桩水平承载性状试验研究[J].武汉科技大学学报,2016,39(5):387-392.  
TANG Bin, GUO Fanfu, SHEN Jianhua. Experimental Study on Horizontal Bearing Capacity of Single Pile in Zhanjiang Formation Structural Clay[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(5):

387-392.

- [3] 王端端,周志军,吕彦达,等.湿陷性黄土中成孔方式对桩基承载力影响试验研究[J].岩土力学,2015,36(10):2927-2933.  
WANG Duanduan, ZHOU Zhijun, LÜ Yanda, et al. An Experimental Study of Influence of Drilling Method on the Bearing Capacity of Pile Foundation in Collapsible Loess Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2927-2933.
- [4] 董晓明,高仕赵,宋军,等.非均匀湿陷条件下黄土地区桩基力学性状试验研究[J].公路交通科技,2016,33(6):32-39.  
DONG Xiaoming, GAO Shizhao, SONG Jun, et al. Experimental Study on Mechanical Property of Pile Foundation in Loess Area under Condition of Non-uniform Collapsibility[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(6): 32-39.
- [5] 陈迪,任青,刘阳,等.侧向荷载作用下砂土与黏土中桩的受力性状研究[J].水资源与水工程学报,2016,23(1):212-216.  
CHEN Di, REN Qing, LIU Yang, et al. Study on Stress Property of Clay and Sand Middle Pile under Effect of Lateralload[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 23(1): 212-216.
- [6] 谈磊,宁帅朋,韩丽婷.输电线路工程预应力灌注桩防蚀设计及施工工艺[J].电力工程技术,2017,36(6):63-67.  
TAN Lei, NING Shuai-peng, HAN Liting. Anti-corrosion Design and Construction Technology for Prestressed Cast-in-place Pile with Serious Corrosion in Transmission Line Towers[J]. Electrical Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 63-67.
- [7] 李芬花,邓丹平,周子楠.基于 ANSYS 的近海工程桩基础  $p$ - $y$  曲线研究[J].水利水电技术,2017,48(6):60-65.  
LI Fenhua, DENG Danping, ZHOU Zinan. ANSYS-based Study on  $p$ - $y$  Curve of Pile Foundation for Offshore Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(6): 60-65.
- [8] 梁发云,陈海兵,黄茂松,等.结构-群桩基础地震响应离心振动台模型试验[J].建筑结构学报,2016,37(9):134-141.  
LIANG Fayun, CHEN Haibing, HUANG Maosong, et al. Model Test on Seismic Response of Superstructure and Pile Group[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 134-141.
- [9] 邵勇,朱进军,马庆华.承台-倾斜桩体系承载力性状分析[J].长江科学院院报,2015,32(12):98-102.  
SHAO Yong, ZHU Jinjun, MA Qinghua. Bearing Capacity Behavior of Inclined Pile-cap System[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(12): 98-102.
- [10] 刘科元,李海滨.地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J].计算机仿真,2017,34(1):423-426.  
LIU Keyuan, LI Haibin. Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 423-426.
- [11] 李善珍,马学宁,田兆斌.路堤荷载下长短桩加固黄土地基影响因素的分析[J].铁道科学与工程学报,2017,14(2):241-249.  
LI Shanzhen, MA Xuening, TIAN Zhaobin. Research on Influence Factors of Long-short Pile Reinforced Loess Foundation under Embankment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(2): 241-249.

[11] 李易,陆新征,叶列平.基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析Ⅱ:悬链线机制[J].建筑结构学报,2011,32(11):9-16.  
LI Yi,LU Xinzheng,YE Lieping.Progressive Collapse Resistance Demand of RC Frame Structures Based on Energy MethodⅡ: Catenary Mechanism[J].Journal of Building Structures,2011,32(11):9-16.

[12] Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects;GSA2003[S].Washington D.C.;General Service Administration,2003.

[13] Design of Buildings to Resist Progressive Collapse;DoD2005[S].Washington D.C.;Department of Defense,2005.

[14] JIAN H,ZHENG Y.Simplified Models of Progressive Collapse Response and Progressive Collapse-resisting Capacity Curve of RC Beam-column Substructures[J].Journal of Performance of Constructed Facilities,2014,28(4):757-766.

[15] LEE Cheol-Ho,KIM Seonwoong,LEE Kyungkoo.Parallel Axial-flexural Hinge Model for Nonlinear Dynamic Progressive Collapse Analysis of Welded Steel Moment Frames[J].Journal of Structural Engineering,2014,136(2):165-173.

[16] USMANI A S,CHUNG Y C,TORERO J L.How Did the WTC Towers Collapse:A New Theory[J].Fire Safety Journal,2003,38(6):501-533.

[17] Seismo Soft.SeismoStruct-A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures[CP/OL].SeismoSoft,2012;http://www.seismosoft.com.

\*\*\*\*\*  
(上接第 479 页)

[12] TRUNG N T.The Dynamic Behavior of a Steel Pipe Sheet Pile Foundation in a Liquefied Layer During an Earthquake[J].Structural Engineering,2014,2(1):116-135.

[13] 彭杰,李同春,李凌霞.设计地震作用下拱坝的等效应力应用研究[J].水利水电技术,2015,46(4):50-54.  
PENG Jie,LI Tongchun,LI Lingxia.Research on Application of Arch Dam Equivalent Stress under Effect of Design Earthquake[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2015,46(4):50-54.

[14] 汤斌,郭凡夫,谢亮,等.湛江组结构性黏土中桩基竖向承载性状模型试验[J].水利水电科技进展,2016,36(5):60-64.  
TANG Bin,GUO Fanfu,XIE Liang,et al.Model Test Study on Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation in Zhanjiang Group Structural Clay[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(5):60-64.

[15] ZHU Y,YANG X,MA T,et al.Bearing Behavior and Optimization Design of Large-diameter Long Pile Foundation in Loesssubsoil[J].Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2017,36(4):1012-1023.