高盟,尹诗,徐晓,等.可液化场地大直径扩底桩的动力 p-y 曲线特征研究[J].地震工程学报,2019,41(4):916-924.doi:10. 3969/j.issn.1000-0844.2019.04.916

GAO Meng, YIN Shi, XU Xiao, et al.Characteristics of Dynamic *p*-*y* Curves for Large-Diameter Belled Piles in Liquefiable Sites [J].China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4):916-924.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.916

# 可液化场地大直径扩底桩的动力 *p*-*y* 曲线特征研究

高 盟<sup>1,2</sup>, 尹 诗<sup>1,2</sup>, 徐 晓<sup>1,2</sup>, 陈高鹏<sup>1,2</sup>

(1.山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室,山东 青岛 266590;2.山东科技大学土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590)

摘要:可液化场地大直径扩底桩-土动力相互作用 p-y 曲线研究对扩底桩抗震设计具有重要意义。 基于有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>,分别建立扩底桩和等直径桩的三维有限差分模型,通过在模型底部输入正弦波,得到可液化场地中不同埋深下扩底桩与等直径桩的桩-土动力相互作用 p-y 曲线,对两者的动力 p-y 曲线特征进行对比分析。结果表明:正弦波输入下扩底桩动力 p-y 曲线多呈倒"S"形,随着埋深增加,动力 p-y 曲线滞回圈面积及面积增长速度逐渐减小,斜率逐渐增大;扩底桩与等直径桩动力 p-y 曲线所围成的图形相似,两者动力 p-y 曲线斜率均随埋深增加逐渐增大,扩底 桩动力 p-y 曲线滞回圈面积及面积增长速度在各埋深处均大于等直径桩,利于能量耗散,抗震性能更好。

关键词:大直径扩底桩;动力 p-y 曲线;可液化场地;等直径桩
中图分类号:TU435
文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2019)04-0916-09
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.916

# Characteristics of Dynamic *p*-*y* Curves for Large-Diameter Belled Piles in Liquefiable Sites

GAO Meng<sup>1,2</sup>, YIN Shi<sup>1,2</sup>, XU Xiao<sup>1,2</sup>, CHEN Gaopeng<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering & Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: The p-y curve of the dynamic pile-soil interaction of large-diameter belled piles in liquefiable sites is of great significance for seismic design. Based on the finite-difference program FLAC<sup>3D</sup>, a three-dimensional finite-difference model of the large-diameter belled pile and the equal-diameter pile is established. By inputting a sine wave at the bottom of the model, the p-y curve of pile-soil dynamic interaction between the large-diameter belled pile and the conventional

收稿日期:2018-07-22

基金项目:山东省自然科学基金项目资助(ZR201702160391)

**第一作者简介:**高盟(1974-),男,山东人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事桩基工程及土动力学等岩土工程领域的教学和科研工作。E-mail:gmxyz@sdust.edu.cn。

equal-diameter pile in the liquefiable site is obtained. The dynamic p-y curve characteristics of the large-diameter pile are analyzed, and the characteristics of the dynamic p-y curve are compared between the large-diameter pile and the conventional equal-diameter pile under different buried depths. The results show that the p-y curve of the belled pile under the sinusoidal input is mostly an inverted "S" shape. With the increase of the burial depth, the hysteresis loop area and the area growth rate of the dynamic p-y curve gradually decrease, and the slope gradually increases. The large-diameter belled piles are similar to the dynamic p-y curves of the equal-diameter piles. The slopes of both p-y curves gradually increase with the increase of buried depth. The hysteresis loop area and the area growth rate of the dynamic p-y curve of the large-diameter belled pile are larger than those of the equal-diameter pile in each buried depth, which is conducive to energy dissipation and better seismic performance.

Keywords: large-diameter belled pile; dynamic p-y curves; liquefiable site; equal-diameter pile

## 0 引言

大直径扩底灌注桩由于单桩承载力高、沉降小等优点,被广泛应用于大跨桥梁、柱网结构及高耸结构中。而这些建(构)筑物常建于可液化场地中,一旦发生地震,场地液化会使扩底桩发生严重破坏,这使可液化场地扩底桩抗震设计显得尤为关键。桩一 土相互作用 *p-y* 曲线法是研究可液化场地桩基抗 震问题的有效方法。因此,进行可液化场地扩底桩 动力 *p-y* 曲线的研究对完善桩基抗震设计有重要 理论意义和工程应用价值。

有关可液化场地的桩基础 p-y 曲线已有许多 研究。采用爆炸引发液化的方法,Weaver 等<sup>[1]</sup>对钻 孔桩现场测试,结合标准静力 p-y 曲线修正,获得 动力 p-y 曲线; Rollins 等[2] 基于群桩足尺试验, 研 究桩周土荷载-位移反应,得到动力 p-y 曲线,同时 推导出考虑桩径影响的液化砂土 p-y 曲线经验公 式。在振动台试验的基础上,王建华等[3]研究了液 化土层中桩的水平承载特性,以试验得到的桩身弯 矩为目标,通过调整拟静力计算中的 p-y 参数,分 析了土层液化过程中 p-y 参数的衰减与土的密实 程度、土层累积孔压比之间的相互关系;李雨润 等<sup>[4-5]</sup>根据 API 规范,提出可液化土层中桩基动力 *p*-*y* 曲线的修正方法并给出了相应的修正公式,随 后又对比研究了非液化土和饱和砂土中,直、斜桩水 平动力反应特征、桩身弯矩分布及 p-y 滞回曲线规 律;王成雷等<sup>[6]</sup>依据加权余量法确定土层液化过程 中的动力 p-y 曲线,分析其弱化规律,并给出与拟 静力弱化 p-y 曲线之间的差异;张效禹等[7] 建立液 化场地桩-土动力相互作用三维有限元分析模型,分 析砂土渗透系数、内摩擦角、相对密度、上覆黏土层 厚度及桩径对动力 p-y 曲线的影响。利用数值模 拟的手段,Knappett 等<sup>[8]</sup>在 ABAQUS 软件中嵌入 p-y 曲线数值模型,研究场地液化群桩失效问题。 此外,戚春香等<sup>[9]</sup>通过桩与弱化土层相互作用的模 型试验,描述了具有残余孔压弱化饱和土层双曲型 p-y 曲线参数的变化规律; 尹平保等<sup>[10]</sup>在 Matlock 黏土 p-y 曲线及双曲线型砂土 p-y 曲线基础上,建 立黏、砂性土坡 p-y 曲线,相应地推导出基桩挠曲 微分方程及桩身内力与位移分析的有限差分法解; 李洪江等<sup>[11]</sup>基于 CPTU 测试 p-y 曲线法对可液化 地基处理前后的桩基水平承载动力响应问题进行了 研究; 王晓伟等<sup>[12]</sup>通过拟静力试验研究了砂土地基 小直径单桩的浅层土 p-y 曲线。

由此可见,可液化场地桩基础 p-y 曲线的研究 成果颇丰,但多集中于等直径桩,而关于大直径扩底 灌注桩 p-y 曲线的研究未见报道。大直径扩底桩 因底部扩大,其工作性能与等直径桩有所不同,相应 的 p-y 曲线较等直径桩也会发生一定变化。因此, 本文基于有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>,分别建立扩底桩 和等直径桩的三维有限差分模型,通过在模型底部 输入正弦波,得到可液化场地中不同埋深下扩底桩 与等直径桩的桩-土动力相互作用 p-y 曲线,对其特 征进行了研究,并将不同埋深下两种桩动力 p-y 曲 线的特征进行对比分析。

# 1 计算模型

# 1.1 模型与网格尺寸

整体模型的尺寸应根据所研究的桩土参数进行

确定。本文所研究的扩底桩总长度为 11.5 m,其中 等直段长 10 m,直径 1 m,扩底段长 1.5 m,直径 2 m;等直径桩总长度 11.5m,直径 1 m。土层分 3 层,分别是上层黏土、中间砂土、下层黏土,厚度分别 为 1.5 m、18.5 m、1.5 m。总体模型取 12 m×12 m ×21.5 m。数值计算模型如图 1 所示。

模型与网格的尺寸决定计算的效率,因此在满 足精度的情况下,选择合理的模型与网格尺寸至关 重要。因为只研究桩体附近的数据,对远离桩的土 体没有必要过分的研究,故本模型网格采用渐变形 式,对桩身及附近土体的网格建立相对密集,远离桩 身的网格建立相对疏散,按比率 1.1 的大小递增。



图 1 数值计算模型 Fig.1 Numerical calculation model

#### 1.2 接触面的设置

FLAC<sup>3D</sup>中接触面的建立通常有3种方法,分别为:"移来移去"法,"导来导去"法和"切割模型"法。 本文采用的是切割模型法。模型中设置两个接触 面。第一个是桩与上层黏土的接触面;第二个是桩 与砂土的接触面,包含桩身与砂土的接触面和桩底 与砂土的接触面。第一个接触面法向刚度和剪切刚 度取1×10<sup>8</sup> kPa,内摩擦角取 20°,黏聚力取10 kPa, 如图 2 中 Id1 所示;第二个接触面法向刚度和剪切 刚度取 1×10<sup>8</sup> kPa,内摩擦角取为 24°,黏聚力取 10 kPa。如图 2 中 Id2 所示。接触面部分取值参考 文献[13]。



图 2 接触面示意图 Fig.2 Schematic diagram of the interface

#### 1.3 计算材料属性及力学参数

在 FLAC<sup>3D</sup>中采用体积模量 K 和剪切模量G 描述弹性模量 E 和泊松比v,体积模量和剪切模量根据式(1)、(2)<sup>[14]</sup>来计算:

$$K = \frac{E}{3(1-2v)} \tag{1}$$

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \tag{2}$$

所采用的渗透系数  $k(m^2/Pa \cdot s)$  与土力学中常用的渗透系数 K(cm/s)存在以下关系<sup>[13]</sup>:

 $k(\mathrm{m}^2/\mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}) \equiv K(\mathrm{cm/s}) \times 1.02 \times 10^{-6}$  (3)

模型设置的桩和桩周土材料及力学参数如表1 所列,桩和土的部分参数参考自文献[15]。地下水 位设置与地表平齐。

	表 1	桩和桩周土材料及力学参数	
--	-----	--------------	--

Fable 1	Materials and	mechanical	parameters	of th	he pile	and	surrounding	soil

Table 1 Materials and mechanical parameters of the pite and surrounding son									
参数	上层黏土	砂土	底层黏土	等直径桩	扩底桩				
干密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 040	1 440	1 100	2 400	2 400				
体积模量 K/Pa	$1.471 \times 10^{7}$	$2.941 \times 10^{7}$	$1.471 \times 10^{7}$	$1.67  imes 10^{10}$	$1.67  imes 10^{10}$				
剪切模量 G/Pa	$5.640  imes 10^{6}$	$1.128 \times 10^{7}$	$5.640  imes 10^{6}$	$7.69 \times 10^{9}$	$7.69 \times 10^{9}$				
黏聚力 C/Pa	10 000	0	15 000						
内摩擦角 φ/(°)	25	30	25						
孔隙率 n	0.66	0.46	0.60						
渗透系数	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-13}$						
张力/N	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{10}$						
长度或厚度 L/m	1.5	18.5	1.5	11.5	11.5				
直径 d/m				1	1				
扩底高度 $h/m$					1.5				
扩底直径 D/m					2				

#### 1.4 本构模型

数值模拟能否真实再现土体实际受力过程直接 受本构模型洗取的影响。若要真实模拟可液化场地 桩土动力相互作用,饱和砂土本构模型洗取是关键。 陈育民等<sup>[13]</sup>采用 Finn 模型对可液化砂土进行动力 分析,取得了较好的效果。王根龙等<sup>[16]</sup>利用 FLAC 软件中动力分析模块,将 Finn 模型应用于数值分析 中,能够较好地模拟地震荷载作用下饱和砂土孔压 的变化规律。因此,砂土层选用 Finn 模型。 FLAC<sup>3D</sup>的原理是动力方程的求解,从其算法上来 讲,不论是进行静力分析还是动力分析,其实质都是 运动方程的求解。只是针对静力分析而言,为达到 快速收敛的目的选取了特定的阻尼方式。而在动力 分析中,FLAC<sup>3D</sup>是用阻尼来考虑滞后性的,通过设 置合理的阻尼参数和阻尼形式,同样能够描述桩体 以及土体在动力作用下的滞回曲线和滞回圈。因 此,FLAC<sup>3D</sup>动力分析可以选取任意模型,所以黏土 层采用 Mohr-Coulomb 本构模型。

Finn 模型的机理很好地被 Martin 等<sup>[17]</sup> 描述, Martin 的试验表明,循环剪应变幅值和塑性体积应 变之间的关系与固结压力无关。为实现目的,塑性 体积应变增量  $\Delta \epsilon_{vd}$  仅是总累积体积应变  $\epsilon_{vd}$ 和剪应 变  $\gamma$  的函数:

$$\Delta \varepsilon_{\rm vd} = C_1 (\gamma - C_2 \varepsilon_{\rm vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{\rm vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{\rm vd}} \qquad (4)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 和 $C_4$ 均为模型常数。本文取相对密度为 45%的结晶二氧化硅砂实验数据作为模型常数的值,即 $C_1$ =0.80, $C_2$ =0.79, $C_3$ =0.45, $C_4$ =0.73。

#### 1.5 力学阻尼

局部阻尼的一些特性使其能用来进行动力计 算。因此力学阻尼采用局部阻尼。局部阻尼只需一 个局部阻尼系数 α<sub>1</sub>,其采用以下公式确定<sup>[13]</sup>:

$$\alpha_{\rm L} = \pi D \tag{5}$$

式中:D为临界阻尼比。黏土层临界阻尼比取 5%,砂土层临界阻尼比取 10%。

## 1.6 边界条件

在对桩-土-结构体系进行动力分析时,需采用 人工边界来消除在边界上非真实的反射波。因此模 型选取黏性边界条件来吸收边界的入射波,相当于 在模型的切向和法向上分别设置自由阻尼器从而达 到吸收入射波的目的。除了施加黏性边界条件以 外,模型还设置了自由场边界。设置自由场边界要 求主体网格满足下面三个条件:(1)侧面垂直,法向 分别是 X 向、Y 向;(2)底部水平,重力方向是 Z 向; (3)在自由场边界之前设置其他边界条件。自由场 边界示意图如图 3 所示。



图 3 自由场边界示意图 Fig.3 Free field boundary diagram

在渗流模式下选取的是透水边界条件,沿着透水边界流体可以流入(或流出)模型边界。透水边界 条件是通过固定孔压值来表示的,本文没有给定孔 压值,仅给定了范围,表示所选范围内节点保持原有 的孔压值不变。

# 1.7 底部荷载的输入

可液化场地桩-土相互作用是一个非常复杂的问题,唐亮<sup>[18]</sup>在数值模拟中采用输入正弦波的方式研究桩-土相互作用 *p-y* 曲线,取得了很好的效果。因此,本文亦通过输入正弦波来研究桩-土相互作用 *p-y* 曲线。在模型底部输入正弦波如图 4 所示。加



Fig.4 Acceleration time-history curve under the input of sine wave

速度峰值在 0.5 s 内达到 0.2g,从 2.5 s 起逐渐减 小,3 s 时减小到 0,计算时间为 3 s。由于施加的动 力荷载比较规则,可以用表达式进行描述,故采用 FISH 函数的方法输入。

# 2 动力 p-y 曲线的特征及对比分析

动力 *p*-*y* 曲线法不仅可以综合反映桩一土地 震相互作用、桩和土的材料非线性、上部结构的惯性 作用,而且土性参数对分析结果影响小、计算精度 高,能够灵活适应土性随埋深的变化,又容易与数值 方法结合,因而已经成为研究地震大变形的较为理 想的方法。

#### 2.1 扩底桩动力 p-y 曲线特征分析

图 5 给出了不同埋深处扩底桩动力 *p-y* 曲线。 由图 5 可以看出,随着埋深增加,扩底桩动力 *p-y* 曲 线滞回圈所围成的面积整体减小。*p-y* 曲线滞回圈 面积变小,体现出耗能减小,吸收的能量减少。这说 明桩身下部相较于上部耗能小,可认为造成这种现



Fig.5 Dynamic *p*-*y* curves of large-diameter belled pile at different depths

象的主要原因是在上部荷载的作用下,上部桩产生 较大弯矩,从而使其桩土相对位移和土反力较大。 同时观察到,随埋深的增加,扩底桩动力 p-y 曲线 中靠近中心的线圈逐渐密集,外部线圈逐渐减少,说 明 p-y 曲线滞回圈的增长速度随埋深增加逐渐变 慢,这同样体现出扩底桩下部耗能小的特性。在埋 深 3.5 m、4.5 m、6 m 以及 7.5 m 处,扩底桩动力 py 曲线呈倒"S"形,埋深 2 m、10.5 m 处与其他埋深 处 p-y 曲线不同,滞回曲线形状发生变化,并不呈 倒"S"形,为椭圆形。这是因为随着埋深增加砂土 液化程度发生改变,从而使滞回曲线形状发生改变。 在动力 p-y 滞回曲线中,桩土相对位移有正有负, 说明在桩土相互作用中交替出现桩推土和土推桩的 现象。

这里把 *p*-*y* 曲线近似长轴顶点连接成线,并将 该直线的斜率定为动力 *p*-*y* 曲线的主斜率,该斜率 可近似反映桩侧土体的刚度。对比图 5(a)、5(b)、5 (c)、5(d) 中 *p*-*y* 曲线近似长轴顶点连线的斜率可 以看出,随着埋深增加,*p*-*y* 曲线近似长轴顶点连线 的斜率逐渐增大,桩侧土体刚度呈增大的趋势。同 时还观察到沿埋深从上往下土反力和桩土相对位移 变化规律一致,即随着埋深的增加,土反力和桩土相 对位移整体减小。对比分析图 5(d)、5(e)可知,随 着埋深增加,土反力和桩土相对位移减小,但埋深 7.5 m处 *p*-*y* 曲线近似长轴顶点连线的斜率相对小 于埋深 6 m 处的斜率,表明埋深 7.5 m 处桩侧土体 刚度要小于埋深 6 m 处,并未随埋深增加而变大。 这可认为是土体在埋深 7.5 m 处较埋深 6 m 处软化 更为严重造成的。

由以上分析可知,正弦波输入下扩底桩的 p-y 曲线多呈倒"S"形,随着埋深增加,p-y 曲线所围成 的面积不断减小,p-y 曲线滞回圈面积增长速度变 小,其近似长轴顶点连线的斜率逐渐增大。这表明 随着埋深增加,扩底桩桩体耗能减小,土反力和桩土 相对位移减小,桩侧土体刚度呈增大的趋势,且在桩 土相互作用中交替出现桩推土和土推桩的现象。

#### 2.2 扩底桩与等直径桩动力 p-y 曲线对比分析

图 6 给出了不同埋深处等直径桩动力 p-y 曲 线。由图 6 可以看出,等直径桩动力 p-y 曲线特征 与扩底桩相似,形状多呈倒"S"形,随着埋深增加, 动力 p-y 曲线滞回圈的面积整体减小,曲线近似长 轴顶点连线的斜率呈增大的趋势。这表明随着埋深 增加,等直径桩下部桩耗能也不断减小,桩侧土体刚 度也呈增加的趋势。

对比图 5、图 6 扩底桩与等直径桩动力 p-y 曲 线滞回圈的面积可知,扩底桩动力 p-y 曲线在各埋 深处均比等直径桩动力 p-y 曲线所围成的面积大, 且扩底桩动力 p-y 曲线中土反力和桩土相对位移 的最大值也大于等直径桩。在埋深 3.5 m、4.5 m、6 m、10.5 m处,扩底桩 p-y 曲线所围成的面积相对 于等直径桩有明显的增大,在埋深 2 m 及 7.5 m 处 面积增大不明显。p-y 曲线滞回圈面积变大,体现 出耗能增大,吸收的能量增加,抵抗变形能力增强, 从而使扩底桩更不容易发生破坏,对抵抗模型底部 输入的动力荷载越有利。埋深 10.5 m 处对应着扩 底桩的扩底部位,因为扩底桩扩底端直径的增加使 桩底体积增大,从而使其 p-y 曲线所围成的面积明 显大于同埋深处等直径桩,这表明扩底桩的扩大端 对抵抗模型底部输入的动力荷载有利。

从图 5、图 6 还可以观察到,等直径桩动力 *p-y* 曲线滞回圈面积增长速度较慢,滞回圈线条大多集 中在中心处,外部线条较少,与之相对,同埋深处扩 底桩滞回圈面积增长速度明显加快,这个现象在埋 深 3.5 m、4.5 m、6 m 处尤其明显。这更能体现出扩 底桩比等直径桩耗能大,吸收能量多的特点。

由以上分析可得,扩底桩与等直径桩动力 p-y 曲线所围成的图形相似,不论是扩底桩还是等直径 桩,距地表越深处的动力 p-y 曲线的主斜率越大, 即距地表越深处桩侧土体刚度越大。但扩底桩动力 p-y 曲线在各埋深处均比等直径桩动力 p-y 曲线所 围成的面积大,滞回圈面积增长速度快。反映出扩 底桩相较于等直径桩耗能大,吸收能量的能力强,抵 抗变形的能力强,桩更不容易发生破坏,对抵抗模型 底部输入的动力荷载的能力强。

#### 3 数值模拟结果可靠性验证

王成雷等<sup>[6]</sup>基于振动台试验获得的数据,得到 不同埋深下土层液化过程中的等直径桩动力 *p-y* 曲线如图 7 所示。其中 *A*、*B*、*C*分别表示从 2.5~ 6 s之间不同时间段的动力 *p-y* 曲线,曲线 *D* 是采 用折减系数对静力 *p-y* 曲线进行折减后得到拟静力 弱化 *p-y* 曲线。由于振动台试验的细节与数值模 拟可能存在一定差异,因此这里主要分析两者 *p-y* 曲线变化规律的异同。

对比图 6、图 7 可知,数值模拟与振动台试验得 到的动力 *p*-y曲线滞回圈形状都呈现倒"S"形,所





围成的面积均随埋深的增加逐渐减小,体现出下部 桩耗能小的特性。虽然数值模拟与振动台试验得到 的 *p-y* 曲线主斜率有所差别,但主斜率的变化趋势 是相同的,即随着埋深的增加,主斜率变大。因此可 以说明数值模拟的数据是相对可靠的。

#### 4 结论

本文采用有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>,针对可液化 场地桩-土动力相互作用,建立相应的有限差分数

值模型,讨论正弦波输入下大直径扩底桩动力 p-y 曲线特征,并与不同埋深下等直径桩动力 p-y 曲线 进行对比分析,结论如下:

(1) 正弦波输入下扩底桩动力 *p-y* 曲线多呈倒 "S"形,随着埋深增加,动力 *p-y* 曲线滞回圈面积逐 渐减小,面积增长速度减小,动力 *p-y* 曲线斜率逐 渐增大。说明扩底桩下部桩耗能减小,桩侧土体刚 度呈增大趋势。

(2) 扩底桩与等直径桩动力p-y曲线所围成的





图形相似,两者动力 p-y 曲线斜率均随埋深增加逐 渐增大。但扩底桩动力 p-y 曲线滞回圈面积及面 积增长速度在各埋深处均比等直径桩大,反映出扩 底桩相较于等直径桩耗能大,抗震能力强。

#### 参考文献(References)

- [1] WEAVER T J, ASHFORD S A.ROLLINS K M.Response of 0.6 m Cast-In-Steel-Shell Pile in Liquefied Soil under Lateral Loading[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1):94-102.
- [2] ROLLINS K M, HALES L J. p-y Curves for Large Diameter Shafts in Liquefied Sand from Blast Liquefaction Tests [J]. Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations, 2006,2:11-23.
- [3] 王建华,冯士伦.液化土层中桩基水平承载特性分析[J].岩土 力学,2005,26(10):1597-1601.

WANG Jianhua, FENG Shilun. Research on Lateral Resistance of Pile Foundation in Liquefaction Strata[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(10):1597-1601.

- [4] 李雨润,袁晓铭,梁艳.桩-液化土相互作用 p-y 曲线修正计算 方法研究[J].岩土工程学报,2009,31(4):595-599.
  LI Yurun,YUAN Xiaoming,LIANG Yan.Modified Calculation Method of p-y Curves for Liquefied Soil-Pile Interaction[J].
  Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(4):595-599.
- [5] 李雨润,张雨雷,陈张升,等.液化土中对称双斜桩动力反应特 征及 p-y 曲线规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018, 37(1):239-250.

LI Yurun, ZHANG Yulei, CHEN Zhangsheng, et al. Dynamic Response and *p*-*y* Curve of Symmetric Inclined Piles in Liquefied Soil[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1):239-250.

[6] 王成雷,王建华,冯士伦.土层液化条件下桩土相互作用 p-y 关系分析[J].岩土工程学报,2007,29(10):1500-1505.
WANG Chenglei, WANG Jianhua, FENG Shilun. Analysis on p-y Curves of Soil-Pile Interaction in Liquefied Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(10):1500-

1505.

- [7] 张效禹,唐亮,凌贤长,等.液化场地桥梁桩-土动力相互作用 p-y曲线特性研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(5):619-625.
   ZHANG Xiaoyu,TANG Liang,LING Xianzhang, et al. Analysis on Characteristics of Dynamicp-y Curves for Soil-Pile Interaction in Liquefiable Ground[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng,2014,34(5):619-625.
- [8] KNAPPETT J A, MADABHUSHI S P G.Modelling of Liquefaction-Induced Instability in Pile Groups[J].Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations.2006,2:255-267.
- [9] 戚春香,王建华.弱化饱和土层中桩的双曲型 p-y 曲线[J].天 津大学学报,2010,43(3):215-221.
  QI Chunxiang,WANG Jianhua.Hyperbolicp-y Curve of Pile in Saturated Degradation Strata[J].Journal of Tianjin University (Science and Technology),2010,43(3):215-221.
- [10] 尹平保,聂道流,杨朝晖,等.斜坡基桩 p-y 曲线及水平承载计 算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2018.37(4):996-1003.
   YIN Pingbao, NIE Daoliu, YANG Zhaohui, et al. The p-y Curve and Computation Method of the Horizontal Bearing Capacity of Piles in Sloping Ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(4):996-1003.
- [11] 李洪江,杨昊坤,刘松玉,等.可液化地基处理前后单桩水平承 载动力响应特征[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46 (5):1098-1102.

LI Hongjiang, YANG Haokun, LIU Songyu, et al. Lateral Dynamic Bearing Response Properties of Single Pile before and after Liquefaction Ground Treatment [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5); 1098-1102.

[12] 王晓伟,叶爱君,商宇.砂土地基小直径单桩的浅层土 *p*-*y* 曲 线[J].岩土工程学报,2018,40(9):1736-1745.

WANG Xiaoweil, YE Aijun, SHANG Yu, Shallow-Layer *p-y* Curves for Single Micropile in Sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1736-1745.

- [13] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京: 中国水利水电出版社,2009.
   CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D Foundation and Engineering Examples[M].Beijing:China Water&Power Press,2009.
- [14] 李广信.高等土力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2016.
   LI Guangxin.Higher Soil Mechanics[M].2nd ed.Beijing:Tsinghua University Press,2016.
- [15] 陈育民,刘汉龙,赵楠.抗液化刚性排水桩振动台试验的数值 模拟研究[J].土木工程学报,2010,43(12):114-119.
   CHEN Yumin,LIU Hanlong,ZHAO Nan.Laboratory Test on Anti-Liquefaction Characteristics of Rigidity-Drain Pile
   [J].China Civil Engineering Journal,2010,43(12):114-119.
- [16] 王根龙,林玮,蔡晓光.基于 Finn 本构模型的饱和砂土地震液 化分析[J].地震工程与工程振动,2010,30(3):178-184.
  WANG Genlong, LIN Wei, CAI Xiaoguang, Seismic Liquefaction Analysis of Saturated Sand Soil Based on Finn Constitutive Model[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2010,30(3):178-184.
- [17] GEOFFREY R Martin, H Bolton Seed, W D Liam Finn.Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading[J].Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(5):423-438.
- [18] 唐亮.液化场地桩一土动力相互作用 p-y 曲线模型研究[D].
   哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
   TANG Liang. p-y Model of Dynamic Pile-Soil Interaction in Liquefying Ground[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010.