

DOI: 10.11779/CJGE2015S1011

# 双向循环荷载作用下码头群桩基础受力特性数值分析

左殿军<sup>1,2</sup>, 陈龙<sup>2</sup>, 田志伟<sup>3</sup>, 齐昌广<sup>4</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所岩土工程研究中心, 天津 300456; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;  
3. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006; 4. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 依据天津某液化天然气接收站码头工程, 采用 ABAQUS 有限元软件研究了码头全直桩基础在波浪和车辆双向循环荷载作用下的受力特性, 讨论了循环周期对基桩受力特性的影响。结果表明: 在竖向和水平向双向循环荷载作用下, 基桩受力重新分布, 桩身轴力逐渐变大, 侧摩阻力减小, 其中中排桩桩身轴力增加幅度最大; 基桩侧摩阻力变化主要集中在 1/3 桩长以上范围; 循环周期对基桩受荷分布产生较大影响, 随着循环周期的变大, 基桩受荷分布逐渐调整, 前、后排桩桩身轴力逐渐变大, 中排桩桩身轴力减小, 排桩侧摩阻力均减小, 当荷载循环周期达到一定值时, 排桩的桩身轴力、侧摩阻力不再变化, 趋于稳定。

**关键词:** 水平循环荷载; 竖向循环荷载; 群桩基础

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0051-05

**作者简介:** 左殿军(1983-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 工程师, 主要从事软土地基加固处理技术、重金属污染土治理与控制技术方面的研究。E-mail: zdj647@163.com。

## Numerical study on mechanical characteristics of pile groups of wharf foundation under lateral and vertical cyclic loadings

ZUO Dian-jun<sup>1,2</sup>, CHEN Long<sup>2</sup>, TIAN Zhi-wei<sup>3</sup>, QI Chang-guang<sup>4</sup>

(1. Geotechnical Engineering Research Center, Tianjin Research Institute for water transport engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210006, China; 4. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Based on a liquefied natural gas terminal wharf project in Tianjin, the finite element software ABAQUS is used to study the mechanical characteristics of pile groups of wharf foundation under lateral and vertical cyclic loadings, and the influence of cyclic period of lateral and vertical loadings is discussed. The results indicate that under the lateral and vertical cyclic loadings, the stress of piles redistributes, the shaft force of piles increases, and the side resistance decreases. The increase amplitude of shaft force row piles is the largest. The range of side resistance is mainly concentrated in the area of more than 1/3 of pile length. The cyclic period has great influence on the stress redistribution: with change of the cyclic period, load distribution of piles adjusts gradually, the shaft forces of front and back row piles increase, and the shaft forces and side resistances of the middle row piles decrease. When the cyclic period reaches a certain value, the shaft forces and side resistances of piles no longer change and tend to a steady state.

**Key words:** lateral cyclic loading; vertical cyclic loading; pile group

## 0 引言

离岸深水港码头、人工岛护岸所处沿海地区属于开敞海域, 上部覆盖软土层均质性差。码头桩基上部自由段较长, 在波浪、船舶和码头车辆双向循环荷载长期作用下, 其承载性状和破坏机理更为复杂<sup>[1]</sup>。

国内外学者针对水平循环荷载作用下单桩及群桩的受力特性已做了较多研究<sup>[2-10]</sup>, 指出由于循环荷载的作用, 桩周土出现累积塑性变形, 桩-土相互作用刚度弱化, 群桩承担的荷载重新分布, 并采用折减系数

给出了群桩中基桩极限承载力计算方法; 不同于单向循环荷载, 在水平向和竖向双向循环荷载耦合作用下, 基桩荷载承担比和破坏模式更为复杂, 相关文献较少。一些专家<sup>[11]</sup>通过模型试验、数值模拟研究了双向循环荷载下单桩的动力学特性, 指出双向循环荷载作用下, 桩顶水平极限荷载、桩身弯矩、桩身轴力较单向加载时都有所增加, 并且桩身最大弯矩点沿桩身下降<sup>[11]</sup>;

黄亮亮等<sup>[12]</sup>采用室内模型试验研究了 3×3 群桩在竖向和水平静载的条件下排桩弯矩及桩顶位移,指出随着竖向荷载的增大,桩的极限水平荷载也增大;在竖向、水平向荷载共同作用下,前桩所承受的弯矩大于中桩,中桩弯矩大于后桩。上述研究表明了双向循环荷载作用下,基桩承载特性不同于单向循环荷载,但对于群桩的承载特性研究仅局限于双向静载条件。

本文采用数值模拟方法研究了码头群桩基础在双向循环荷载下的受力性状,分析了循环加载过程中的前排、中排、后排桩的受力特性,讨论了循环周期对基桩受力特性的影响。

1 工程概况和地质条件

某液化天然气接收站(LNG)工程位于天津港大港港区,地基为天津典型滨海软土区,港区海域波浪最大波高 4.50 m,周期 8.0 s,与码头正向交叉,码头前水深 18.00 m。码头平台单幅尺寸为 8.20 m×32.20 m(长×宽),采用 3×10 群桩基础,设计桩长 50 m,桩径 0.8 m,图 1 为码头群桩剖面及桩位布置图。

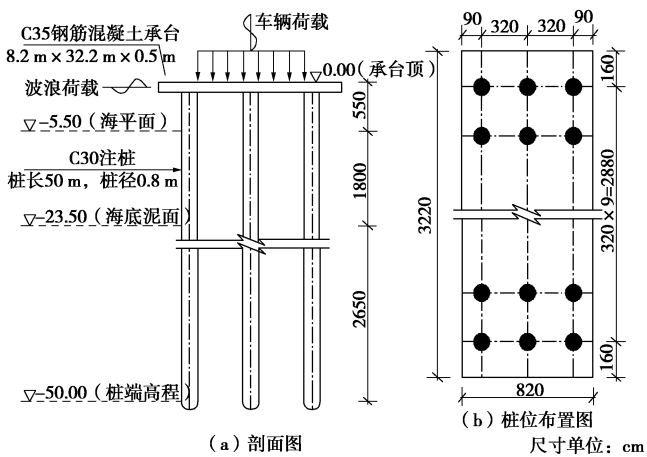


图 1 码头平台剖面图及桩位布置图

Fig. 1 Section of wharf platform and layout of piles

码头地基土层由上而下依次为:①1-1 淤泥,海涂面上的淤泥,物理力学性质极差;②1-2 淤泥质粉质黏土,流塑状,稍具层理,为新近沉积的高含水率、低强度、高压缩性软土,物理力学性质差,承载力低;

③2 粉土,松散—稍密状,局部含淤泥质黏土软弱夹层,土质较均匀,物理力学性质较好;④3-1 淤泥质粉质黏土,含水率高、强度低,压缩性高的软土;⑤3-2 细砂,稍密—中密状,土层厚度不均;⑥4-1 粉质黏土,可塑—硬塑状,土质较均匀,物理力学性质较好;⑦5-1 粉质黏土,偏流塑状,物理力学性质较差,承载力较低。各土层厚度及物理力学指标如表 1 所示。

2 三维数值模型的建立

2.1 模型尺寸及计算参数选取

文献[13]指出,为避免模型边界条件设置对计算结果产生影响,在群桩基础数值模拟计算过程中,模型单侧宽度应大于 30D(D 为基桩直径),高度应大于 2Le(Le 为基桩嵌入土层深度),因此,根据图 1,数值计算模型尺寸取 60 m×60 m×60 m。

图 2 为基于 ABAQUS 有限元软件数值计算模型图,模型坐标原点位于承台中心处,共建立 114208 个单元,124352 个节点。承台、群桩采用三维八节点减缩单元(C3D8R),地基土体采用三维十节点协调单元(C3D10I)。网格划分时,承台、基桩及桩周 2D 范围内土体网格进行了加密,其他区域土体网格划分较疏。承台顶面和侧面分别施加附属结构静载,车辆及波浪循环荷载,约束模型土体四周水平位移及底部竖向位移。

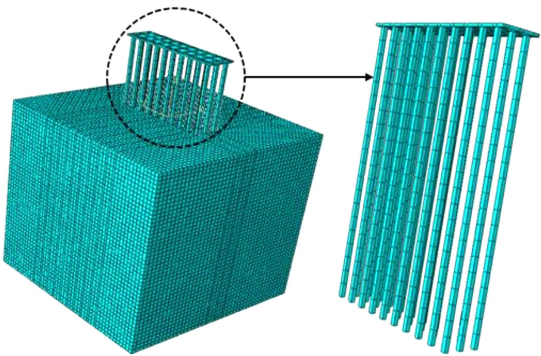


图 2 码头群桩基础数值计算模型

Fig. 2 Numerical model of wharf trestle platform

表 1 各土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indices of soils

土层编号	土层名称	层厚/m	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	桩极限侧摩阻力 $q_{sk}$ /kPa	桩极限端阻力 $q_{pk}$ /kPa	孔隙比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
①	淤泥	0.6	—	1.80	0		—	0.6	12.0	1.76
②	淤泥质黏土	2.8	42.4	1.69	24		1.174	13.5	11.1	2.48
③	粉土	8.0	30.0	1.89	39		0.852	14.0	23.0	6.25
④	淤泥质粉土	10.0	44.2	1.75	23		1.273	13.0	12.5	1.80
⑤	细砂	3.5	25.6	1.74	46		0.754	0.0	34.9	9.68
⑥	粉质黏土	10.4	30.4	1.77	41	360	0.852	17.8	15.6	6.11
⑦	粉质黏土	—	33.4	1.79	42	310	0.961	14.8	27.0	4.90

码头群桩及承台材料采用弹性本构模型, 其中群桩桩体采用 C30 混凝土, 弹性模量 30 GPa; 承台采用 C35 混凝土, 弹性模量 31.5 GPa, 泊松比均为 0.20; 土体采用莫尔-库仑模型, 密度、黏聚力、摩擦角采用表 1 数值, 弹性模量  $E$  按下式计算<sup>[14]</sup>:

$$E = (2.5 \sim 3.5) E_s, \quad (1)$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $E_s$  为压缩模量。

基桩桩顶与承台底部固接, 桩端与土采用 tie 连接<sup>[15]</sup>, 其原因在于端承桩桩端与桩端土表面紧密相连, 不会脱开; 桩侧与土采用面一面有限滑动摩擦, 摩擦角  $\delta$  按下式计算<sup>[16]</sup>:

$$\delta = \tan^{-1}(\sin \varphi \times \cos \varphi / (1 + \sin^2 \varphi)), \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为土体内摩擦角。

## 2.2 荷载的简化及施加

根据《海港水文规范》<sup>[17]</sup>, 对于小尺度桩 ( $D/L < 0.2$ ), 作用于整个桩上的波浪总力可按式进行计算:

$$P_h = P_{Dmax} \cos \omega t |\cos \omega t| - P_{lmax} \sin \omega t, \quad (3)$$

式中,  $P_{Dmax}$ ,  $P_{lmax}$  为作用于桩上最大速度力和惯性力, 按下式计算:

$$P_{Dmax} = C_D \frac{\gamma D H^2}{2} K_1, \quad (4)$$

$$P_{lmax} = C_M \frac{\gamma A H^2}{2} K_2, \quad (5)$$

式中,  $C_D$ ,  $C_M$  分别为速度力和惯性力系数, 取 1.2, 2.0。

由于码头栈桥两侧均为开敞海域, 涨落潮时, 波浪对各个基桩产生的总力近似相等, 由此, 波浪对群桩基础产生的水平力近似为各个基桩承受的波浪力总和。另外, 与码头单个单元桩数及宽度相比, 将波浪力简化为作用于承台侧面水平循环荷载产生的附加弯矩对桩身受力的影响可以忽略不计。

码头车辆沿栈桥移动荷载简化为单幅承台顶面竖向循环荷载, 按下式计算<sup>[18]</sup>:

$$P_v(t) = P_v \times \left[ 1 + \sin \left( \frac{2\pi}{T_2} t \right) \right], \quad (6)$$

式中,  $P_v$  为承台顶面竖向循环荷载振幅, 根据码头设计车辆容许荷载, 取 550 kN;  $T_2$  为单台车辆通过单幅承台时间, 取 72 s。

模型建立后进行自重下地基应力平衡, 为避免循环荷载施加导致桩土接触失效, 计算不收敛, 荷载施加前, 先在承台顶面施加微小荷载, 然后施加附属结构静载荷, 最后施加车辆及波浪循环荷载进行计算分析, 计算时间分别取  $T = 5760$  s (即  $10 T_1 T_2$ )。

## 3 计算结果分析

### 3.1 桩身轴力的变化

图 3 为双向循环荷载作用下, 码头基桩桩身轴力随深度变化图, 其中图 3 (a) 为排桩中心桩桩身轴力沿深度分布图, 图 3 (b) 为排桩角桩桩身轴力沿深度分布图。从图中可以看出, 中排桩桩身轴力最大, 后排桩次之, 前排桩最小; 同一排桩中心桩的桩身轴力大于边桩, 这说明: 与传统竖向荷载作用下, 各基桩承担的荷载相同规律不同, 在双向循环荷载作用下, 基桩承受的竖向荷载重新分布, 与双向静载条件下基桩承担的荷载对比来看, 中排桩承担的荷载增大 30%, 前、后排桩承担的竖向荷载减少约 10%~20%, 分析其原因在于水平循环荷载作用使得中排桩产生附加弯矩。同时, 从桩身轴力沿深度分布曲线和土层侧摩阻力表可以看出, 在泥面以下 3 m (即 -23.5~-26.5 m) 深度范围桩侧摩阻力并未完全发挥, 桩身轴力零点加深, 反映出在循环荷载作用下, 桩周土一定深度范围内桩-土相互作用刚度出现弱化。

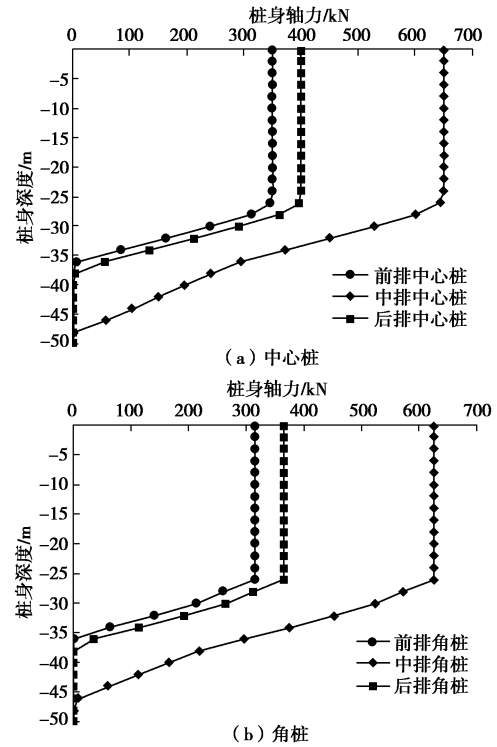


图 3 码头排桩桩身轴力沿深度分布图

Fig. 3 Distribution of shaft force of wharf trestle platform

### 3.2 桩身侧摩阻力的变化

图 4 为双向循环荷载作用下, 码头基桩桩身侧摩阻力随深度变化图, 其中图 4 (a) 为排桩中心桩侧摩阻力沿深度分布图, 图 4 (b) 为排桩角桩侧摩阻力沿深度分布图。由图 4 和表 1 中可以看出, 桩身侧摩阻力变化范围主要位于桩长 1/3 桩长 (-23.5~-26.5 m) 以上部分, 这部分桩身侧摩阻力减少较多, 比较不同排桩, 中排桩受到影响较大; 同一排桩, 中心桩桩侧摩阻力减少较多, 这与桩身轴力分析的变化趋势一致,

反映出桩-土相互作用在双向循环荷载作用下出现刚度弱化的现象, 比较而言, 桩周土弱化对桩侧摩阻力的影响大于对桩身轴力的影响, 其原因在上部土层侧摩阻力较小, 桩周土弱化带来的侧摩阻力损失对桩身轴力整体影响不大。

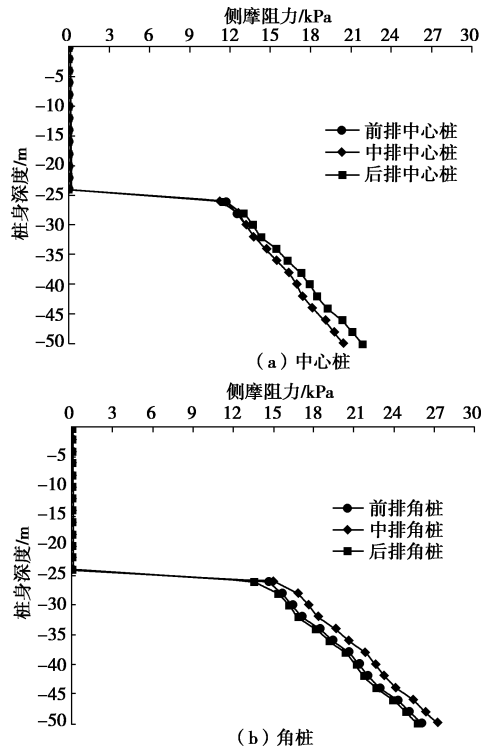


图4 码头排桩侧摩阻力沿深度分布图

Fig. 4 Variation curves of side resistance of wharf trestle platform

### 3.3 循环周期的影响

为分析双向循环荷载周期对基桩受力的影响, 分别取  $T = 10 T_1 T_2$ ,  $20 T_1 T_2$ ,  $50 T_1 T_2$ ,  $100 T_1 T_2$ ,  $200 T_1 T_2$ 。由于循环荷载对基桩受力影响主要集中在  $-23.5 \sim -26.5$  m 范围内, 故选取基桩  $-25$  m 截面进行分析。图5为不同循环周期下基桩  $-25$  m 界面受力变化图, 其中图5(a)为轴力变化图, 图5(b)为侧摩阻力变化图。从图中可以看出, 随着双向循环荷载周期的增大, 前排中心桩、角桩桩身轴力逐渐变大, 侧摩阻力减小; 中排中心桩桩身轴力、侧摩阻力变小, 但减少幅度有限; 后排桩桩身轴力、侧摩阻力出现小幅增加; 但当循环周期增大到  $100 T_1 T_2$ , 前、中后排桩桩身轴力、侧摩阻力均不再变化, 达到稳定状态。说明在双向循环荷载作用下, 码头群桩基础基桩承担的竖向荷载随着循环周期的变化不断调整, 具体而言, 前、后排桩承担的荷载越来越大, 中排桩承担的荷载越来越小, 当循环周期达到一定程度时, 基桩承担的荷载达到稳定状态, 其原因在于在双向循环荷载作用下, 基桩承担的荷载重新分布, 桩-土相互作用出现刚度弱化, 基桩侧摩阻力减小, 弱化深度范围存在临界

值。

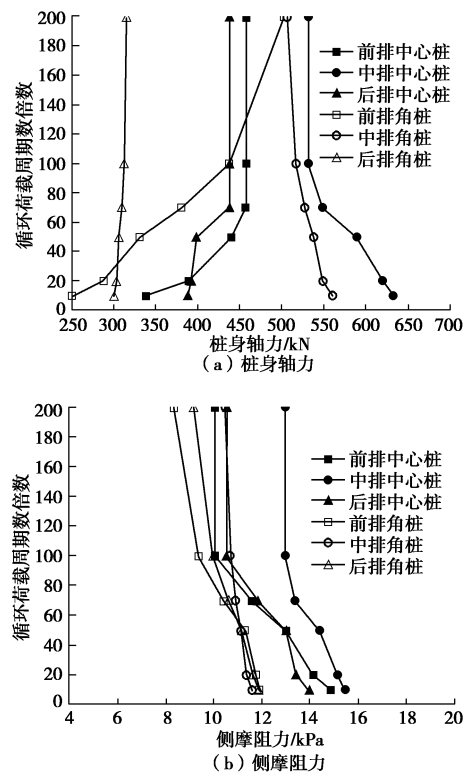


图5 不同循环周期下码头排桩受力曲线图

Fig. 5 Mechanical characteristics of piles under different cyclic loadings

## 4 结 论

基于天津某液化天然气接收站码头工程, 采用 ABAQUS 有限元软件研究了码头全直桩基础在波浪和车辆双向循环荷载作用下的受力特性, 讨论了循环周期对基桩受力特性的影响。得出以下4点结论:

(1) 在双向循环荷载作用下, 码头基桩受荷重新分布, 基桩桩身轴力逐渐变大, 侧摩阻力减小, 其中中排桩桩身轴力增加幅度最大, 侧摩阻力变化范围主要集中在  $1/3$  桩长以上范围内。

(2) 从同一排桩计算结果对比来, 在双向循环荷载作用下, 中心桩承担的荷载变大, 角桩相对较小。

(3) 循环荷载周期对基桩受荷重分布产生较大影响, 随着循环周期的变大, 基桩受荷重分布逐渐调整, 前、后排桩桩身轴力逐渐变大, 中排桩桩身轴力减小; 排桩侧摩阻力均减小, 当循环荷载周期达到一定值, 排桩的桩身轴力、侧摩阻力不再变化, 达到稳定值, 说明在循环荷载作用下, 桩-土相互作用刚度弱化深度范围存在临界值。

(4) 关于双向循环荷载作用下群桩的承载特性及破坏模式比较复杂, 国内外相关研究文献较少, 本文仅通过数值模拟研究了群桩的承载特性, 尚需结合模型

试验深入研究其破坏模式及承载机理。

### 参考文献:

- [1] 王元战, 龙俞辰, 王禹迟, 等. 离岸深水全直桩码头承载特性与简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1573 - 1579. (WANG Yuan-zhan, LONG Yu-chen, WANG Yu-chi, et al. Bearing behavior and simplified calculation method of all-vertical-piled wharf in offshore deep water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1573 - 1579. (in Chinese))
- [2] BROWN D A, REESE Lymon C, O'NEIL Michael W. Cyclic lateral loading of a large-scale pile group[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(11): 1326 - 1343.
- [3] RAO S N, RAO K M. Behavior of rigid piles in marine clays under lateral cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 1993, **20**(3): 281 - 293.
- [4] MOSS R E S, CALIENDO J A, ANDERSON L R. Investigation of a cyclic laterally loaded model pile group[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **1998**(17): 519 - 523.
- [5] BASACK S, PURKAYASTH R D. Behavior of single pile under lateral cyclic load marine clay[J]. Asian Journal of Civil Engineering (Building And Housing), 2007, **8**(4): 443 - 458.
- [6] MARTIN A, YU-SHU K, KHALID A R. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load[J]. Computers and Geotechnics, 2009(36): 725 - 735.
- [7] CHANDRASEKARAN S S, BOOMINATHAN A, DODAGOUDAR G R. Experimental investigations on the behavior of pile groups in clay under lateral cyclic loading[J]. Geotechnical and Geological Engineering, **2010**(28): 603 - 617.
- [8] ABDRAHBO F M, GAAVER K E. Simplified analysis of laterally loaded pile groups[J]. Alexandria Engineering Journal, 2012(12): 121 - 127.
- [9] 陈仁朋, 顾明, 孔令刚, 等. 水平循环荷载下高桩基础受力性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 1990 - 1996. (CHEN Ren-peng, GU Ming, KONG Ling-gang, et al. Large-scale model tests on high-rise platform pile groups under cyclic lateral loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 1990 - 1996. (in Chinese))
- [10] 王富强, 荣冰, 张嘎, 等. 水平循环荷载下风电机桩基础离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 1926 - 1930. (WANG Fu-qiang, RONG Bing, ZHANG Ga, et al. Centrifugal model test of pile foundation for wind power unit under cyclic lateral loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 1926 - 1930. (in Chinese))
- [11] PARVIN A, WANG Wei. Concrete columns confined by fiber composite wraps under combined axial and cyclic lateral loads[J]. Composite Structures, 2002(58): 539 - 549.
- [12] 黄亮亮, 樊平. 竖向水平向荷载共同作用下排桩模型试验研究[J]. 工程勘察, **2012**(7): 23 - 27. (HUANG Liang-liang, FAN Ping. Experimental study on behaviors of axially and laterally loaded row piles[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, **2012**(7): 23 - 27. (in Chinese))
- [13] HELWANY S. Applied soil mechanics: with ABAQUS applications[J]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [14] 杨敏, 赵锡宏. 分层土中的单桩分析法[J]. 同济大学学报, 1992, **20**(4): 421 - 427. (YANG Min, ZHAO Xi-hong. An approach for a single pile in layered soil[J]. Journal of Tongji University, **20**(4): 421 - 427. (in Chinese))
- [15] HWLWANY S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [16] RANDOLPH M F, WORTH C P. Application of the failure state in undrained single shear to shaft capacity of driven piles[J]. Géotechnique, 1981, **31**(1): 143 - 157.
- [17] JTS145—2—2013 海港水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013. (JTS145—2—2013 Code of hydrology for sea harbour[S]. Beijing: China Communication Press, 2013. (in Chinese))
- [18] 杨龙才, 郭庆海, 周顺华, 等. 高速铁路桥桩在轴向循环荷载长期作用下的承载和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13): 2362 - 2367. (YANG Long-cai, GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua, et al. Dynamic behaviors of pile foundation of high-speed railway bridge under long-term cyclic loading in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock and Engineering, 2005, **24**(13): 2362 - 2367. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)