

DOI: 10.11779/CJGE2023S10008

激振荷载作用下桩基础动力响应的现场试验分析

曹小林^{1,2}, 周凤玺^{1,2}, 戴国亮³, 龚维明³

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;
3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 为了研究水平和竖向激振动力荷载作用下单桩和群桩的承载特性, 设计了水平和竖向激振荷载下单桩、两桩、三桩和四桩在多层土中的动力试验方案。对现场试验数据采集得到了单桩、两桩、三桩和四桩的桩头位移, 分析了桩头位移随着激振频率和桩数的变化规律。基于试验结果, 给出了单桩、两桩、三桩和四桩的水平 and 竖向刚度, 分析了桩头刚度随着桩数和激振频率的变化规律。并采用刚度得到了群桩动力效率系数, 分析了动力效率系数随着群桩桩数和振动频率的变化规律。试验结果给出了位移、桩头刚度和群桩相互作用系数的变化规律, 为简化理论计算方法和验证计算模型提供了宝贵的数据。

关键词: 现场试验; 桩基础; 动力响应; 激振荷载; 群桩刚度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0171-05

作者简介: 曹小林(1990—), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: xlcao@lut.edu.cn。

Field tests on dynamic response of pile foundation under exciting loads

CAO Xiaolin^{1,2}, ZHOU Fengxi^{1,2}, DAI Guoliang³, GONG Weiming³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To study the bearing characteristics of single pile and pile groups under horizontally and vertically exciting dynamic loads, a dynamic test plan is designed for single pile, two piles, three piles and four piles in multi-layer soil under horizontally and vertically exciting loads. The pile-head displacements of single pile, two piles, three piles and four piles are obtained from field test data, and the variation laws of the pile-head displacements with exciting frequency and pile number are analyzed. Based on the test results, the horizontal and vertical stiffnesses of single pile, two piles, three piles and four piles are given, and the variation of pile-head stiffness with the number of piles and exciting frequency is analyzed. The dynamic efficiency coefficient of the pile group is obtained through the stiffness, and its variation laws with the number of piles in the pile group and vibration frequency are analyzed. The test results may provide valuable data for simplifying the theoretical methods and verifying the relevant models through changes in displacement, pile-head stiffness and interaction coefficient of pile groups.

Key words: field test; pile foundation; dynamic response; exciting load; group pile stiffness

0 引言

桩基础由于承载力高、沉降量小、抗液化和抗拉拔能力强而被广泛应用, 桩基作为高层建筑、桥梁和港口的基础, 不仅要承受上部结构传递的荷载, 还要承受风、地震、机械振动和其他人为活动产生的动力荷载^[1]。针对桩基础的动力响应, 学者已开展了大量的研究, 主要包括理论分析^[2-8]、室内模型试验^[9]和数值模拟^[10], 现场试验的研究相对较少。

目前通过试验方法研究桩基础的动力响应主要以

室内模型试验为主^[11-13], 系统的现场试验研究未发现。本文通过系统的场地试验研究了多层土中单桩和群桩在水平和竖向荷载下的动力响应, 通过位移幅值曲线分析了桩与桩之间的相互作用规律。基于试验结果得到了单桩和群桩的水平刚度和竖向刚度, 并研究了刚度和群桩效率系数随着桩数的变化规律。

基金项目: 国家自然科学基金项目(12362032, 51978320); 兰州理工大学红柳优秀人才支撑计划
收稿日期: 2023-07-07

1 激振试验加载方案

试验所采用的激振设备为动刚度变频多功能激振器 JZQN-30/50, 其利用 1 台变频电动机通过 1 根刚性轴连接并驱动 2 台振动器, 调整 2 台振动器的不同组合, 实现竖向、水平和扭转振动。设备振动频率为 1~50 Hz, 竖向、水平激振力为 0.09~35.17 kN, 激振设备的外形尺寸为 1600 mm×380 mm×497 mm。激振设备的振动频率由频率控制器控制, 通过频率控制器调节频率的大小来改变离心质量块的转速, 以控制激振力的大小, 加载系统实物图如图 1 所示。

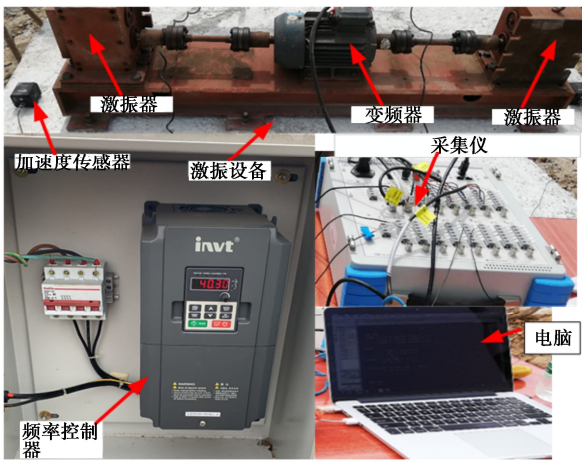


图 1 加载系统实物图

Fig. 1 Diagram of loading system

2 现场试验概况

桩所在的土层从上到下分为三层: 第一层为杂填土, 重度为 1.70 g/cm³, 厚度为 2.4 m; 第二层为粉质黏土, 重度为 1.86 g/cm³, 厚度为 8.2 m; 第三层为粉质砂, 重度为 1.60 g/cm³, 厚度为 5.6 m。桩的下端嵌于粉砂中, 距地面的深度为 12.8 m, 桩头嵌入承台 0.2 m。勘测结果显示, 土层从上到下分别为杂填土 1-1、粉质黏土 2-2 和粉质砂 2-3。土层力学性能指标见表 1。

表 1 土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil layers

层号	含水率 w/%	相对质量 密度 G _s	重度 γ/ (kN·m ⁻³)	干重度 γ _d / (kN·m ⁻³)	孔隙 比 e	塑性指 数 I _p	液性指 数 I _L
2-2	42.3	2.73	17.4	12.2	1.20	15.2	1.21
2-3	26.2	2.69	18.5	14.7	1.00	8.0	0.78

试验分组包括单桩、两桩、三桩和四桩, 每组试验所选用的桩长、桩径、壁厚和桩身混凝土均相同。试验所采用的试验桩为预应力高强混凝土管桩, 高强混凝土管桩型号为 PHC-500-A-130-C80-13, 即桩长为 13 m, 桩径和壁厚分别为 500 mm 和 130 mm。桩身采

用高强混凝土 C80。单桩、两桩、三桩和四桩的现场试验图片如图 2 所示, 加速度传感器和位移传感器沿竖向布置, 桩间距为 0.9 m。

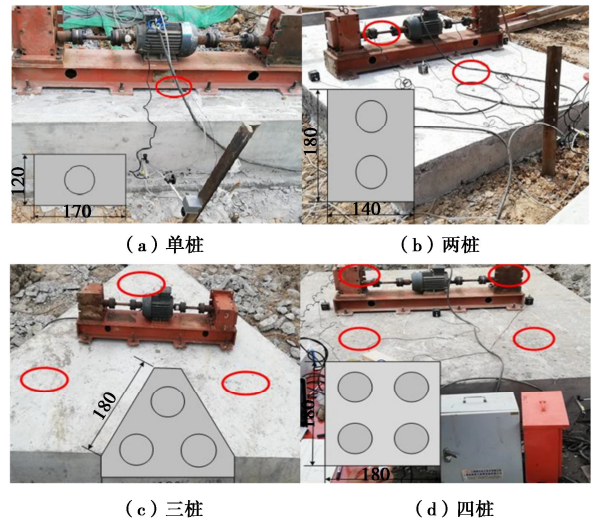


图 2 桩的布置及现场加载实物图

Fig. 2 Layout of piles and on-site loading

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

在激振荷载作用下, 提取单桩、两桩、三桩、四桩的位移时程曲线中每个周期中最大的位移, 得到水平位移幅值曲线, 如图 3 所示。从图 3 可以发现, 任意激振频率对应的单桩的水平位移幅值最大, 四桩的水平位移最小, 但是单桩与群桩的水平位移幅值曲线并不是倍数关系。这是因为群桩中的桩与桩之间存在相互的作用, 且此互相作用受桩间距的影响很大; 此外, 随着频率的增大, 单桩、两桩、三桩、四桩的位移幅值逐渐增大, 因激振力幅值 Q ($Q = m\epsilon\omega^2$) 是频率的二次方, 激振力随着频率的增大持续增大, 导致桩头位移随着时间的增大而增大。

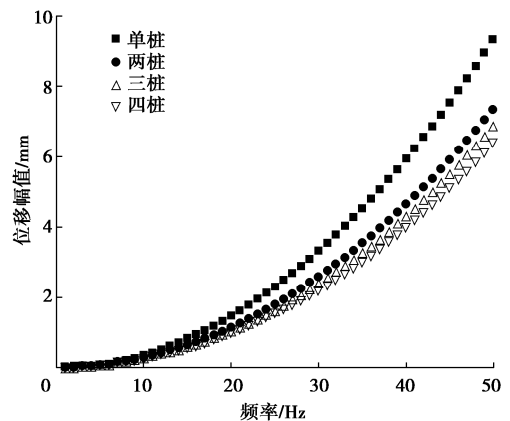


图 3 水平位移幅值曲线

Fig. 3 Curves of horizontal displacement amplitude

单桩、两桩、三桩、四桩竖向位移幅值曲线如图 4 所示, 从图中可以发现, 单桩的竖向位移幅值最大, 四桩的竖向位移最小, 且单桩与群桩的竖向位移幅值曲线并不是倍数关系。这是因为群桩中的桩与桩之间存在相互的作用。

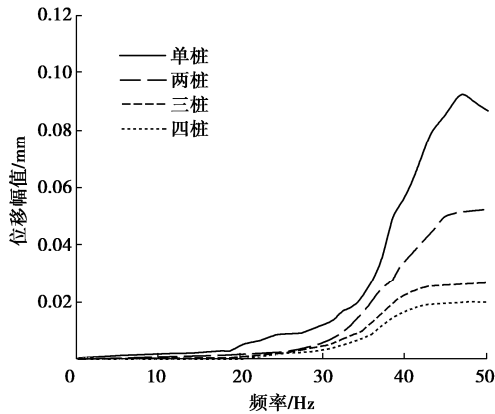


图 4 竖向位移幅值曲线

Fig. 4 Curves of vertical displacement amplitude

3.2 刚度分析

采用《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015) 给出的计算方法可求得单桩、两桩、三桩、四桩的水平弯曲刚度和竖向刚度随着频率的变化结果, 如图 5 和图 6 所示。从图 5, 6 可以发现随着群桩桩数的增多, 群桩的水平刚度和竖向刚度得到了提高, 群桩作为一个整体随着桩数的增多抵抗变形的能力增大。但是, 由于桩与桩之间相互存在影响, 导致单桩与群桩的刚度并不是倍数关系。这是因为群桩在水平荷载作用下, 后排桩受到的土抗力有限, 且群桩中桩与桩之间的相互作用, 使群桩的桩头刚度与单桩的桩头刚度不成倍数关系。在 0~50 Hz 范围内, 随着频率的增大, 单桩、两桩、三桩和四桩的水平刚度先增大后减小。

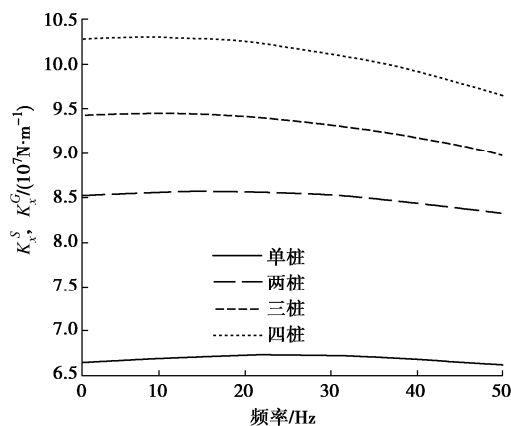


图 5 单桩和群桩的水平刚度随着频率的变化规律

Fig. 5 Variation of horizontal stiffness of single pile and pile groups with vibration frequency

3.3 群桩动力效率系数

动力荷载作用下, 群桩中的任意一根桩不仅要受到直接力包括桩周围的土抗力和桩头的荷载, 还要受到邻近桩在振动过程中产生的波的影响。将群桩振动过程中对其它桩存在影响的桩称之为主动桩, 群桩在振动过程中接受其它振动产生波的影响的桩称之为被动桩。水平动力荷载下群桩中任意一根桩的振动以波的形式对邻近桩产生影响。

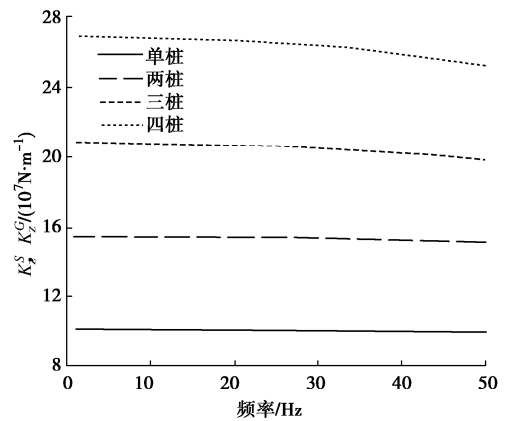


图 6 单桩和群桩竖向刚度随着频率的变化规律

Fig. 6 Variation of vertical stiffness of single pile and pile groups with vibration frequency

通过图 5 给出的单桩和群桩的水平刚度, 计算得到的水平群桩动力效率系数如图 7 所示。从图 7 中可以发现, 随着频率在 10~50 Hz 范围内增大, 四桩动力效率系数逐渐减小, 但是减小的幅值不大, 两桩、三桩和四桩的水平群桩动力效率系数基本上保持不变, 随着桩数的增多, 水平群桩动力效率系数在降低。这是由于随着桩数的增多, 群桩中的每根桩均对邻近桩存在影响, 随着桩数的增多, 这种影响会叠加, 使水平群桩动力效率系数降低。

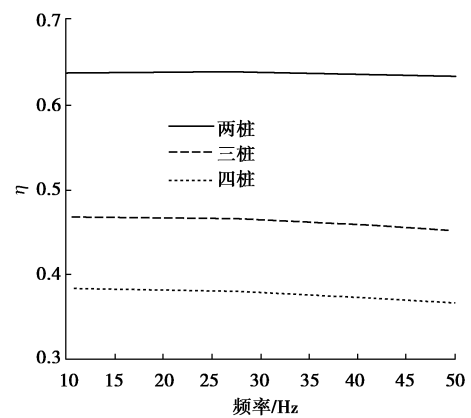


图 7 水平群桩动力效率系数随着频率的变化规律

Fig. 7 Variation of horizontal dynamic efficiency coefficient of pile groups with vibration frequency

通过图 6 给出的单桩和群桩的竖向刚度, 计算得

到的竖向群桩动力效率系数如图8所示。随着频率在10~50 Hz范围内增大,两桩、三桩和四桩的竖向群桩动力效率系数基本上保持不变,随着桩数的增多,水平群桩动力效率系数在降低。

对比图8和图9可以发现,在相同的桩数条件下,竖向群桩动力效率系数大于水平群桩动力效率系数,这说明群桩在动力荷载作用下,水平振动的群桩的桩与桩之间的相互影响更大,这是因为桩与桩之间的相互影响由土传递,水平荷载作用下桩以正应力和剪应力组合的形式传递给土体^[8],而竖向荷载作用下土体仅传递了剪应力^[14]。

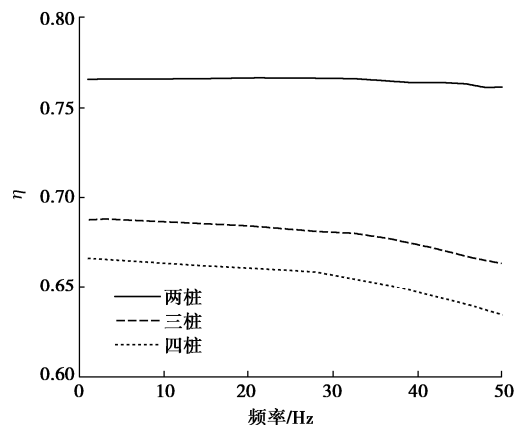


图8 竖向群桩动力效率系数随着频率的变化规律

Fig. 8 Variation of vertical dynamic efficiency coefficient of pile groups with vibration frequency

4 结 论

本研究设计了单桩和群桩的水平和竖向振动现场试验,得到了单桩、两桩、三桩和四桩的水平、竖向的位移幅值曲线。结合《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015)给出的计算方法得到了单桩、两桩、三桩和四桩的水平、竖向刚度,并基于刚度得到了群桩动力效率系数。通过分析得到以下结论:

(1) 随着频率的增大,单桩、两桩、三桩和四桩的水平位移幅值整体呈现增大的趋势,单桩的水平位移幅值最大,四桩的水平位移最小;群桩的水平位移幅值与单桩的位移幅值不成比例关系,这是因为群桩中的桩与桩之间存在相互的作用,且桩与桩之间的相互作用受桩间距的影响很大。

(2) 两桩、三桩和四桩的水平与竖向群桩动力效率系数随着频率在10~50 Hz范围内变化不大;随着桩数的增多,水平群桩动力效率系数在降低。此外,还发现竖向群桩动力效率系数大于水平群桩动力效率系数。

参考文献:

- [1] 丁选明, 郑长杰, 栾鲁宝. 桩基动力学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (DING Xuanming, ZHENG Changjie, LUAN Lubao. Principles of Pile Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese))
- [2] 张石平, 陈曦菲, 姚绍伟, 等. 竖向地震作用下饱和土-桩体系的耦合动力响应[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 81-97. (ZHANG Shiping, CHEN Xifei, YAO Shaowei, et al. Coupled dynamic responses between saturated soil and pile systems under vertical earthquakes[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(9): 81-97. (in Chinese))
- [3] 崔春义, 辛宇, 许成顺, 等. Pasternak层状地基中群桩水平动力响应解析解答[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 893-902. (CUI Chunyi, XIN Yu, XU Chengshun, et al. Analytical solutions for horizontal dynamic response for pile groups based on Pasternak model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 893-902. (in Chinese))
- [4] 郑长杰, 崔亦秦, 丁选明, 等. 竖向动荷载作用下端承型群桩动力相互作用解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2187-2195. (ZHENG Changjie, CUI Yiqin, DING Xuanming, et al. Analytical solution for dynamic interaction of end-bearing pile groups subjected to vertical dynamic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2187-2195. (in Chinese))
- [5] 赵密, 黄义铭, 王丕光, 等. 桩顶水平动荷载作用下水-桩-土相互作用的解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 907-915. (ZHAO Mi, HUANG Yiming, WANG Piguang, et al. Analytical solution for water-pile-soil interaction under horizontal dynamic loads on pile head[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 907-915. (in Chinese))
- [6] 梁发云, 李通达, 贾亚杰, 等. 垫层隔震基础动力阻抗薄层法求解及参数分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 883-892. (LIANG Fayun, LI Tongda, JIA Yajie, et al. Thin-layer method for dynamic impedance of isolated foundation with cushions and its parameter analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 883-892. (in Chinese))
- [7] 汪刚, 景立平, 王友刚, 等. 土性对土-桩-核岛结构动力相互作用影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2353-2364. (WANG Gang, JING Liping, WANG Yougang, et al. Experimental study on the influence of soil

- properties on seismic-soil-pile-nuclear island structure interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(11): 2353-2364. (in Chinese))
- [8] CAO X L, DAI G L, GONG W M, et al. Resistance of saturated soil to a laterally vibrating pile[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **141**: 106496.
- [9] 庄海洋, 赵 畅, 于 旭, 等. 液化地基上隔震结构群桩与土动力相互作用振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(6): 979-987. (ZHUANG Haiyang, ZHAO Chang, YU Xu, et al. Earthquake responses of piles-soil dynamic interaction system for base-isolated structure system based on shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(6): 979-987. (in Chinese))
- [10] 景立平, 汪 刚, 李嘉瑞, 等. 土-桩基-核岛体系动力相互作用振动台试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 163-172, 207. (JING Liping, WANG Gang, LI Jiarui, et al. Shaking table tests and numerical simulations of dynamic interaction of soil-pile-nuclear island system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(1): 163-172, 207. (in Chinese))
- [11] 张 聪, 冯忠居, 孟莹莹, 等. 单桩与群桩基础动力时程响应差异振动台试验[J]. 岩土力学, 2022, **43**(5): 1326-1334. (ZHANG Cong, FENG Zhongju, MENG Yingying, et al. Shaking table test on the difference of dynamic time-history response between single pile and pile group foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(5): 1326-1334. (in Chinese))
- [12] 李雨润, 闫志晓, 张 健, 等. 饱和砂土中直群桩动力响应离心机振动台试验与简化数值模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(6): 1252-1264. (LI Yurun, YAN Zhixiao, ZHANG Jian, et al. Centrifugal shaking table test and numerical simulation of dynamic responses of straight pile group in saturated sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(6): 1252-1264. (in Chinese))
- [13] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化场地-群桩基础-结构体系动力响应分析: 大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2173-2181. (XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiuli, et al. Dynamic response analysis of liquefied site-pile group foundation-structure system: large-scale shaking table model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2173-2181. (in Chinese))
- [14] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (ZHANG Zhongmiao. Pile Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))

(编校: 明经平)

(上接 139 页)

- fissure-plane in Nanyang expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(10): 2942-2946. (in Chinese))
- [4] 孙 慧, 徐 晗, 胡 波, 等. 裂隙产状对膨胀土边坡稳定性的影响研究[J]. 人民长江, 2012, **43**(21): 49-51. (SUN Hui, XU Han, HU Bo, et al. Study on influence of fissure occurrence on stability of expansive soil slope[J]. Yangtze River, 2012, **43**(21): 49-51. (in Chinese))
- [5] 龚壁卫, 程展林, 胡 波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1825-1830, 1836. (GONG Biwei, CHENG Zhanlin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 1825-1830, 1836. (in Chinese))
- [6] 陈善雄, 戴张俊, 陆定杰, 等. 考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2014, **45**(12): 1442-1449. (CHEN Shanxiong, DAI Zhangjun, LU Dingjie, et al. Stability analysis considering fracture distribution and strength for expansive soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(12): 1442-1449. (in Chinese))
- [7] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(10): 102-111. (CHENG Zhanlin, LI Qingyun, GUO Xiling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(10): 102-111. (in Chinese))
- [8] 姚海林, 郑少河, 葛修润, 等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(增刊 2): 2331-2335. (YAO Hailin, ZHENG Shaohe, GE Xiurun, et al. Assessment on slope stability in cracking expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(S2): 2331-2335. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)