

DOI: 10.11779/CJGE2024S10029

储煤场堆载对地基和煤棚桩基影响的离心模型 试验研究

元光宗^{1,2}, 李建东^{*1}

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300000)

摘要: 某大型储煤场位于沿海地带, 建设初期通过真空堆载联合预压煤场软土地基进行了预处理。储煤场煤棚基础采用预应力高强度混凝土管桩 (PHC 桩) 进行加固处理, 并在其前方设置水泥搅拌桩 (CDM 桩) 作为保护桩。为了研究煤场长期大面积堆载对地基和桩基煤棚产生的影响, 开展土工离心机模型试验, 模拟了煤场循环堆卸载和 30 a 长期堆载两种工况。实验结果对煤场地基的沉降进行了预测, 通过对桩基础的受力分析, 进一步对煤场进行安全性评估。

关键词: 离心模型试验; 软土地基; 沉降; 弯矩

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0197-05

作者简介: 元光宗(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事岩土工程土工离心机模型试验方面的研究工作。E-mail: yuanguangzong@163.com。

Centrifugal model tests on influences of loads of a coal storage yard on foundation and pile-based coal shed

YUAN Guangzong^{1,2}, LI Jiandong¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China; 2. School of Architectural Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300000, China)

Abstract: A large coal storage yard is located in the coastal zone, and the soft ground foundation of the coal yard is pre-treated by vacuum pile-loading joint pre-treatment at the early stage of construction. The coal shed of the coal storage yard is designed to be reinforced by the PHC group piles, and the CDM protection piles are set up in front of them. In order to study the influences of long-term large-scale pile loading on the foundation and pile-based coal shed, geotechnical centrifugal model tests are carried out to simulate the two working conditions of cyclic pile unloading and long-term pile loading for 30 years in the coal yard. The test results predict the settlement of the foundation of the coal yard, and further evaluated the safety of the coal yard by analyzing the stress of the pile foundation.

Key words: centrifugal model test; soft ground; settlement; bending moment

0 引言

为了兼顾生产需求和环境保护, 现如今大型储煤场多采用大跨度和高度的全封闭式煤棚, 煤棚结构多采用群桩基础。储煤场在长期大面积堆载作用下, 软土地基会产生较大沉降, 从而对煤棚桩基产生影响。杨敏等^[1]研究表明长期堆载会产生地基滑动破坏, 引起桩基变形和上部结构破坏。陈福全等^[2]研究了单排桩、双排桩在地面堆载荷载大小与作用位置、桩与土层条件、桩身约束条件等工况中的性状。金宗川等^[3]通过现场实测的方法, 研究了大面积堆载作用下软土地基的变形特性, 并得到地表沉降量随时间的变化关系李忠诚等^[4]建立三维有限元模型针对实际工程堆载

事故进行分析, 对堆载作用下土体的侧向位移模式进行了探讨与总结。梁发云等^[5]采用室内模型试验研究轴向受荷桩在土体侧移作用下的承载和变形特性。李志伟^[6]研究了在单侧堆载的作用下, 桩基将产生侧向偏移及附加弯矩。梁彪^[7]采用数值模拟+现场试验的方法, 对沿海储煤场软弱地基预压预应力高强混凝土管桩处理方案进行了对比研究。

本文结合实际工程, 开展离心模型试验来预测储煤场长期堆载的沉降情况, 并对桩基受力进行分析,

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS20240401)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者 (E-mail: jiandongli09@163.com)

实验结果为设计施工和三维数值模拟提供参考。

1 离心模型试验设计

1.1 试验场地及设备

本次试验场地为交通运输部天津水运工程科学研究所，所使用的离心机为 TK-C500 型土工离心机，由中国工程物理研究院总体工程研究所研制，其最大容量为 500g·t，有效半径达到 4.5 m 以上，最大加速度为 250g，如图 1 所示。

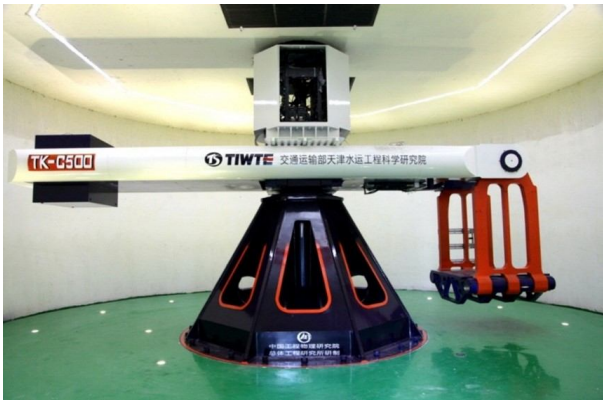


图 1 TK-C500 型土工离心机

Fig. 1 TK-C500 geotechnical centrifuge

1.2 模型设计

(1) 模型比尺

根据煤棚基础平面设计图，结合地层特点、模型箱尺寸、模型制作和边界条件等因素，选定模型比尺为 $N=70$ ，试验模型如图 2 所示，主要物理量相似比尺见表 1。

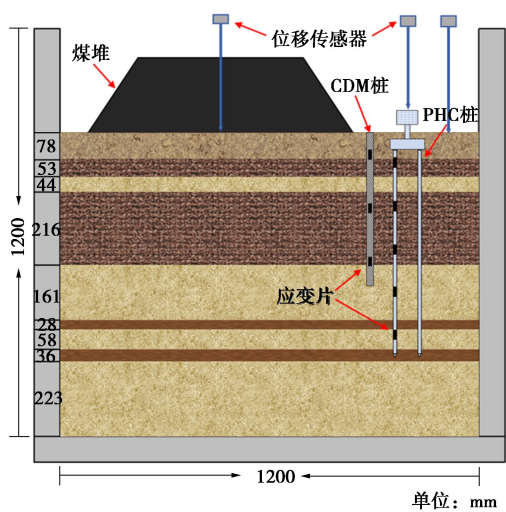


图 2 试验模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test model

(2) 地基模型

该沿海煤场研究区域的土层主要由粉质黏土、淤泥质黏土、黏土和砂土组成。试验组参考现场勘测资

料确定试验用土和用砂指标，地基土层及砂层制模指标参数见表 2 中。

表 1 土工离心机试验相似比尺

Table 1 Scaling laws of centrifugal model tests

加速 度	长度/ 位移	密度	质量	应力	应变	抗弯 刚度	均布 荷载
N	N	1	$1/N^3$	1	1	$1/N^4$	1

表 2 土层参数

Table 2 Parameters of soils

土层	厚度/ mm	质量密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然含 水率/ w	内摩擦 角/($^\circ$)	压缩模量 /MPa
粉质黏土	78	1.80	20.0	25	5.5
淤泥质黏土	53	—	35.8	—	—
砂土	44	1.90	27.0	25	2.3
淤泥质黏土	216	—	39.3	—	—
砂土	161	1.95	23.0	27	14
黏土	28	1.92	30.0	—	16
砂土	58	1.95	25.0	29	21
黏土	36	1.92	30.0	—	16
砂土	223	1.95	25.0	29	21

对于地基土层来讲，土的压缩模量是判断土的压缩性和计算地基压缩变形量的重要指标之一。试验组选取天津滨海新区沿海吹填区的粉质黏土、高岭土、福建标准砂作为基土进行各层土样的配制，通过不同的比例来混合干土样，参考现场勘测资料中的密度和天然含水量开展固结试验，测得此种土样的压缩模量，并与勘测资料进行对比，误差小于 5%方可达到试验要求。

本试验中，砂层原料平均粒径比值 $d_{50}=0.17$ ，模型桩径/平均粒径比值为 53，大于 50，满足试验要求，因此砂土颗粒粒径无需进行缩尺。参照现场勘查资料对应砂层的含水率和密度指标开展直剪试验和固结试验，测得其内摩擦角和压缩模量指标并与现场资料进行比对，要求误差小于 5%，如不满足这一要求，适当添加粗料或细料以调节内摩擦角，通过此种方法完成砂料的制备。

试验组针对不同类型的土样采取不同的方法进行制备。模型地基土层制备之前，将排水体放入模型箱底部。地基中的黏土层均经过烘干—粉碎—筛分—拌和—分层振动击实法等步骤完成制备，砂土层采用砂雨法制备并进行饱和。

(3) 桩基模型

煤棚基础采用高强度钢筋混凝土群桩基础，PHC 管桩 $\phi 600\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ，抗裂弯矩为 $245.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，极限弯矩为 $441.4\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，桩长约 40~44 m，模型若采用原型混凝土材料，缩尺后将导致结构过于薄弱，本试验按照等效刚度相似原则选取 6061T6 铝合金材料进行替代。经图纸计算桩基钢筋配筋率为 0.96%，普

通钢材弹性模量为 200 GPa, C85 混凝土弹性模量为 38.5 GPa, $EA=E_1A_1+E_2A_2$, 其中: E 为等效弹性模量; E_1 为钢筋模量, E_2 为混凝土模量; A 为桩截面积; A_1 为钢筋截面积; A_2 为混凝土截面积。计算得桥梁桩基的等效弹性模量 $E=40$ GPa。6061 铝合金弹性模量为 69 GPa, 相似比 $N=70$, 根据模型抗弯刚度等效公式 $E_p I_p / E_m I_m = N^4$, 式中 I 为截面惯性矩, 计算得到桩基模型管直径为 9 mm, 壁厚为 0.5 mm, 桩长 636 mm。

试验时, PHC 群桩上部承台会安装垂向和水平荷载配重块, 用来模拟煤棚自重施加的荷载。

为了满足桩的抗弯承载能力要求, 设计采取了保护措施, 在煤棚基础的前方设置一排水泥搅拌桩 (CDM 桩) 对基础桩身进行保护, 降低软土层的变形对桩身产生的弯矩。实际工程中 CDM 桩搭接施工呈花生状, 本试验中对 CDM 桩进行简化, 拟采用弹性模量约 200 MPa 的 ABS 塑料板进行模拟。PHC 群桩模型和 CDM 桩模型如图 3 所示。

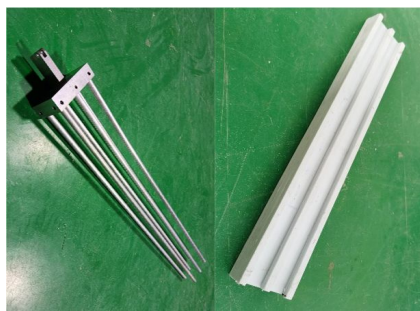


图 3 PHC 桩和 CDM 桩

Fig. 3 PHC and CDM piles

(4) 煤场堆载模拟装置

试验将煤场堆载简化为均布荷载, 采用液压加载装置对煤场场地施加竖向轴力进行堆载模拟, 液压加载系统通过力传感器和位移传感器的反馈信号进行动态控制, 可根据需要设置分级加载级数, 并实现对高离心环境下模型的自动化加载。

1.3 试验工况及监测方案

(1) 试验工况

启动离心机开始试验, 以 20g 为一级, 分级加载至 70g, 稳定运行 2 h (相当于原型 408 d), 以还原土体的应力状态。观察土面位移传感器的读数变化, 趋于稳定之后, 开展加载试验。试验模型布置图如图 4 所示。

经确认, 现场加载周期为 11.65 h, 卸载周期为 16.1 h。换算后, 试验中一个加载周期时间为 8.55 s, 一个卸载周期时间为 11.83 s, 分级进行加卸载操作, 10 个加载周期约 220 s。由于现场加卸载时间不确定, 模型加卸载简化为 10 个无时间间隔的连续周期, 加载时程

曲线如图 5~7 所示。10 个循环加载周期完成后, 模拟满载 30 a 工况 (模型加载时长 53.6 h)。

(2) 监测方案

试验中, 共设置了 4 个沉降监测点, 通过在加载板上的动态差动位移传感器, 间接测得煤场堆载区域内土体的沉降变化, 用于绘制 $t-S$ 曲线 (沉降位移随加载时间变化曲线, 横坐标为加载时间 t , 纵坐标为沉降位移 S , 均为原型尺度单位); 桩基承台及其外测布置激光位移传感器, 用于检测桩基承台和堆载区域外的土体沉降变化; PHC 桩和 CDM 桩桩身均布有全桥应变片, 用于测量桩身变形, 获得 PHC 桩弯矩和 CDM 桩剪力变化曲线。

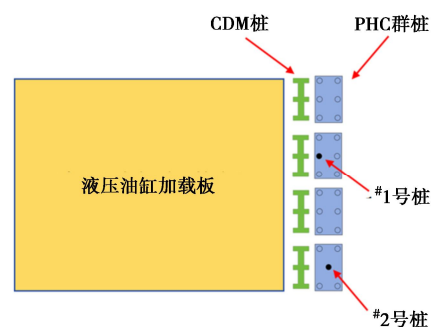


图 4 试验模型布置图

Fig. 4 Layout of test model

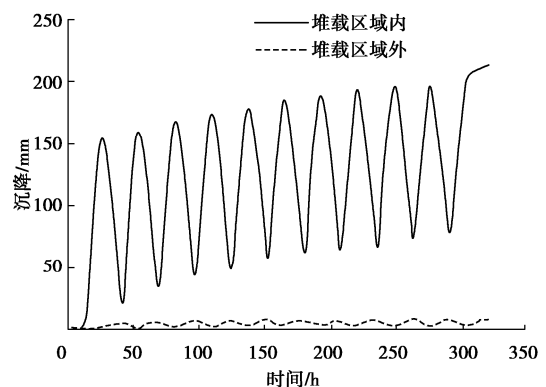


图 5 循环期地基表层 $t-S$ 曲线

Fig. 5 $t-S$ curves of foundation during cyclic loading period

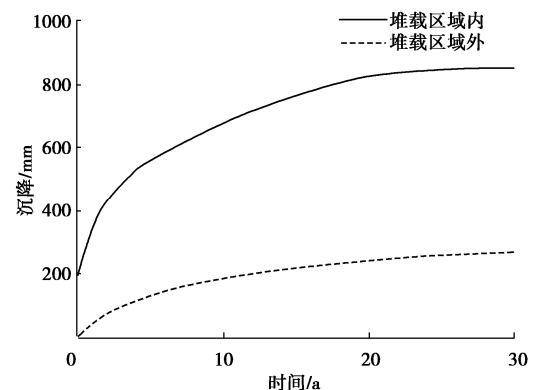


图 6 恒载期地基表层 $t-S$ 曲线

Fig. 6 $t-S$ curves of foundation during constant loading period

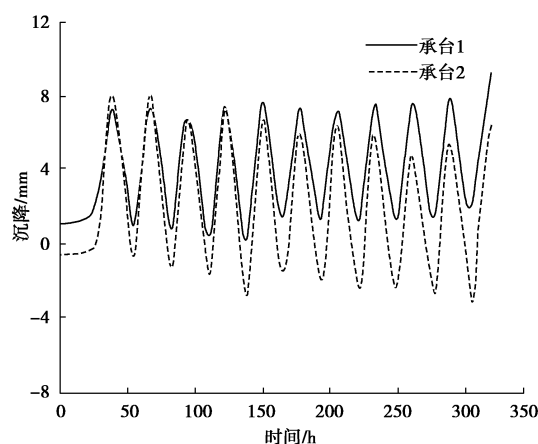
图7 循环期承台 t - S 曲线

Fig. 7 t - S curves of bearing platform during cyclic loading period

2 试验结果分析

2.1 地基沉降变化

10 个循环加载周期内,堆载区域外 3 m 处的沉降量在 3~9 mm 之间往复变化。随着堆载周期的增加,堆载区域内地基表层沉降量不断增大,堆载至 160 kPa 时的沉降量从 0.5 t 的 160 mm 上升到 10.5 t 的 203 mm。循环期地基表层 t - S 曲线如图 5 所示。

30 a 恒载期内,堆载区域外 3 m 处的沉降量在前 5 a 增长较快,达到 138 mm; 20 a 后才开始趋于平稳,30 a 的整体沉降量约为 270 mm。堆载区域内地基表层沉降量在前 5 a 增长较快,达到 567.6 mm; 25 a 后才开始趋于平稳,30 a 的整体沉降量约为 852.9 mm。恒载期地基表层 t - S 曲线如图 6 所示。

2.2 桩基顶部承台沉降变化

前 10 个循环加载周期内, #2 承台沉降时程曲线总体平稳,最大沉降量约为 8.5 mm; #4 承台沉降时程曲线总体呈微弱下降趋势,最大沉降量约为 8~9 mm。循环期承台 t - S 曲线如图 7 所示。

在 30 a 恒载期内, #2 承台的沉降量在前 5 a 增长较快,15 a 后趋于平稳,30 a 的整体沉降量约为 60.0 mm; #4 承台沉降曲线与 #2 承台相似,30 a 的整体沉降量约为 60.7 mm。恒载期承台 t - S 曲线如图 8 所示。

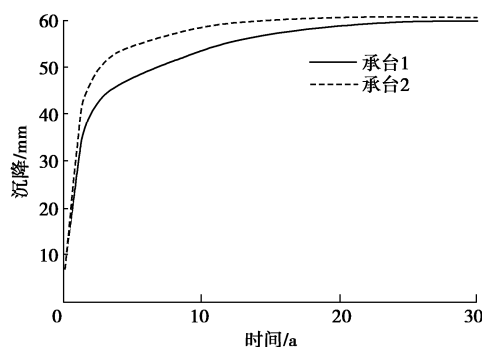
图8 恒载期承台 t - S 曲线

Fig. 8 t - S curves of bearing platform during constant loading period

2.3 PHC 桩弯矩变化

10 个循环加载周期内,各桩的桩身弯矩整体呈缓慢增长的趋势。30 a 恒载期内,各桩的桩身弯矩整体呈增长趋势,前 5 a 增长速度较快,25 a 后基本趋于稳定。#1 桩桩身弯矩形态呈 S 型分布,30 a 后的弯矩最大值位于桩体中部(距桩顶 25.76 m)处,约为 373 kN·m,桩身弯矩曲线图如图 9 所示; #2 桩的桩身弯矩变化趋势与 #1 桩相似,30 年后的弯矩最大值约为 181 kN·m,如图 10 所示。

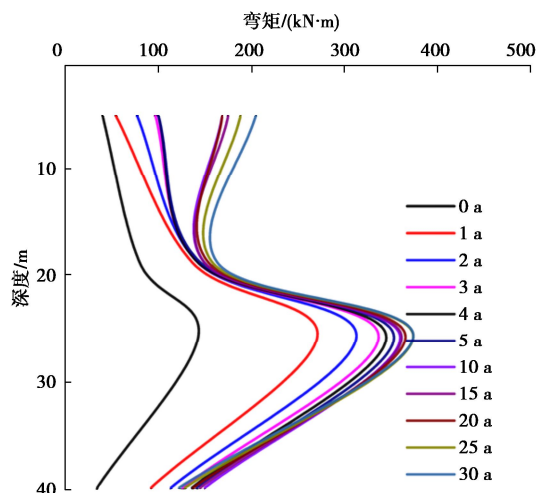


图9 #1 桩桩身弯矩曲线图

Fig. 9 Curves of bending moment of pile 1

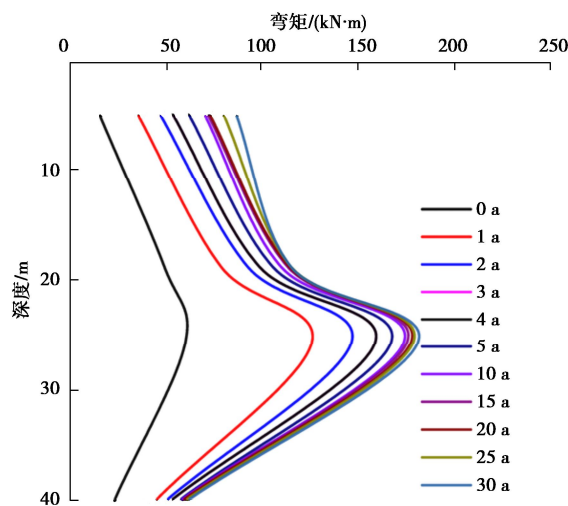


图10 #2 桩桩身弯矩曲线图

Fig. 10 Curves of bending moment of pile 2

2.4 CDM 桩剪力变化

由于试验时间较长,造成 CDM 桩部分应变计发生损坏,现中只能给出循环期 CDM 桩的桩身剪力图。在 10 个循环加载周期内,桩身剪力整体呈缓慢增长的趋势,桩身剪力形态呈折线形分布,剪力最大值位于桩身中部,如图 11 所示。

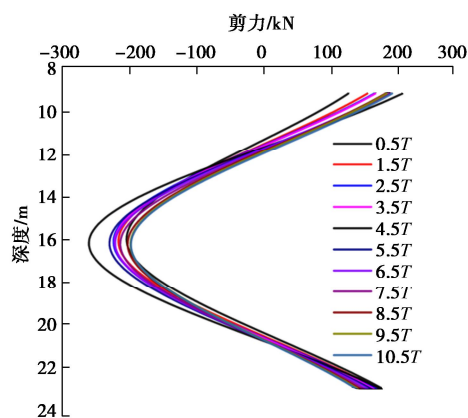


图 11 CDM 桩桩身剪力曲线图

Fig. 11 Curves of shearing force of CDM piles

3 结 论

针对煤场堆载过程对地基和煤棚桩基的影响问题开展试验研究工作, 开展了离心模型试验, 得到以下 4 点结论。

(1) 受本次试验工况和试验装置的限制, 试验中将实际的梯形荷载简化成了均布荷载, 造成靠近煤棚基础附近区域的荷载和地基沉降量与实际相比偏大。

(2) 在堆煤荷载作用下, 由于软土层产生较大变形, 使得桩身产生显著侧向位移, PHC 群桩中靠近堆煤的前桩对后桩具有遮拦效应, 前桩的存在使得后桩的弯矩和变形明显变小。

(3) 由于实验模型箱空间限制, 未能布设水平位移监测传感器, 相对于桩基顶部的沉降响应, 其桩顶的侧向位移与桩基础桩身弯矩有更直接的关系, 实验方案有待改进。

(4) 设计施工时, 应在桩基础前设置保护桩, 以此来减小受力变形。

参考文献:

[1] 杨 敏, 朱碧堂, 陈福全. 堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 446-450. (YANG Min, ZHU Bitang, CHEN Fuquan. Pilot study on collapse of an industrial building due to adjacent surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4):

446-450. (in Chinese))

- [2] 陈福全, 杨 敏. 地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1286-1290. (CHEN Fuquan, YANG Min. Numerical analysis of piles influenced by lateral soil movement due to surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1286-1290. (in Chinese))
- [3] 金宗川, 顾国荣, 韩黎明, 等. 大面积堆载作用下软土地基变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(6): 1056-1060. (JIN Zongchuan, GU Guorong, HAN Liming, et al. Deformation characteristics of soft ground under large-scale pile load[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(6): 1056-1060. (in Chinese))
- [4] 李忠诚, 朱小军. 地面超载条件下土体侧移模式及对邻近桩基影响分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 809-814. (LI Zhongcheng, ZHU Xiaojun. Soil lateral mode and numerical analysis of pile foundation subjected to adjacent surcharge loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 809-814. (in Chinese))
- [5] 梁发云, 姚国圣, 陈海兵, 等. 土体侧移作用下既有轴向受荷桩性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1603-1609. (LIANG Fayun, YAO Guosheng, CHEN Haibing, et al. Indoor modelling of existing axially loaded piles under soil lateral movement[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1603-1609. (in Chinese))
- [6] 李志伟. 软土地基邻近堆载对桥梁桩基偏位的影响研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3594-3600. (LI Zhiwei. Study of influence of surcharge load on lateral displacement of bridge piled foundation in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3594-3600. (in Chinese))
- [7] 梁 庞. 复杂地质条件下储煤场 PHC 群桩加固方案研究[J]. 矿产与地质, 2021(6): 1192-1197, 1204. (LIANG Pang. Research on PHC group pile reinforcement scheme for coal storage yard under complex geological conditions[J]. Minerals and Geology, 2021(6): 1192-1197, 1204. (in Chinese))

(编校: 孙振远)