

朱粟郁. 超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能测试[J]. 华南地震, 2019, 39 (4): 136–141. [ZHU Suyu. Seismic Performance Test of Deep Foundation Pit Pile Supporting Structure of Super High-rise Building[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 136–141]

## 超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能测试

朱粟郁

(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200070)

**摘要:** 为研究地震作用下超高层建筑深基坑排桩支护结构的抗震能力, 提出超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能测试方法, 针对南方地区某超高层建筑施工工地的深基坑工程, 采用中国核动力研究设计院的大型地震模拟振动台测试深基坑排桩支护结构模型抗震能力, 根据弹性地基梁基本原理计算基坑排桩支护结构常规梁单元刚度矩阵和弹性地基梁单元刚度矩阵, 得到深基坑排桩支护结构总刚度矩阵, 依据总刚度矩阵和排桩支护结构静力平衡条件初步得到排桩支护结构位移, 采用压顶梁弹性系数修正总刚度矩阵, 获取准确排桩支护结构位移, 测试超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能。实验测试结果表明, 所提方法可准确测得支护结构横向位移-纵向深度以及排桩桩身位移, 且测得超高层建筑基坑深度越深, 地下连续墙侧向位移随地震等级增大幅度越大, 超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能越差。

**关键词:** 超高层建筑; 深基坑排桩; 支护结构; 抗震性能; 压顶梁; 位移

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2019)04-0136-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.04.020

## Seismic Performance Test of Deep Foundation Pit Pile Supporting Structure of Super High-rise Building

ZHU Suyu

(East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd, ShangHai 200070, China)

**Abstract:** To study the seismic capacity of pile-supporting structures in deep foundation pits of super high-rise buildings under earthquakes, this paper proposes a method for testing the seismic performance of deep foundation pit pile supporting structure of super high-rise building. For a deep foundation pit project at a construction site of a super high-rise building in the southern region, the large-scale earthquake simulation shaking table designed by China Nuclear Power Research and Design Institute is used to test the seismic resistance of the deep foundation pit pile support structure model. According to the basic principles of elastic foundation beams, the conventional beam element stiffness matrix and elastic foundation beam element stiffness matrix of the foundation pit support structure are calculated, and the total stiffness matrix of the deep foundation pit row support structure is obtained. According to the total stiffness matrix and the static equilibrium conditions of the pile supporting structure, the displacement of the pile supporting structure is initially obtained. The elasticity coefficient of the

**收稿日期:** 2018-07-19

**作者简介:** 朱粟郁(1991-), 男, 本科, 主要从事结构设计。

**E-mail:** yujf66@163.com.

roof beam is adopted to modify the total stiffness matrix to obtain the accurate pile supporting structure displacement and test the seismic performance of pile supporting structures for deep foundation pits of super high-rise buildings. The experimental results show that the proposed method can accurately measure the lateral displacements and longitudinal depths of the supporting structure and the displacement of row pile body, and the deeper the foundation pit depth of the super high-rise building is measured, the greater the lateral displacement of the underground diaphragm wall is with the increase of earthquake grade, and the worse the seismic performance of the deep foundation pit row pile supporting structure of the super high-rise building is.

**Keywords:** Super high-rise building; Deep foundation pit pile row; Support structure; Seismic performance; Capping beam; Displacement

0 引言

经济发展造成城市超高层建筑数量逐渐增多，地震发生时地下结构施工和基坑周围环境危险性增高，基坑与排桩支护结构产生较大变形，容易造成严重工程事故，因此需对超高层建筑深基坑排桩支护结构实施全面抗震性能测试，确保超高层建筑在建成后有较强抗震性能，确保人们生命和财产安全。

文献分析砂卵石地层圆形深基坑排桩支护结构受力特征时，仅考虑支护结构在地砂卵石材质土层时的受力特征，得到支护结构抗震性能测试结果较片面；文献 测试不同深度基坑排桩支护结构抗震性能，得到不同深度基坑排桩支护结构抗震结果存在较大差异，测试结果不准确。

因此本文提出超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能测试方法，通过准确获取基坑支护结构和排桩地震位移变化，测得超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能。

1 振动台模拟试验测试

1.1 试验准备

以南方地区某超高层建筑施工工地的深基坑工程为研究背景，该超高层建筑深基坑排桩支护结构如图 1 所示，该基坑形状为矩形，基坑长宽分别为 50.5 m 和 24.5 m，且基坑排桩支护结构是 Φ800 mm 密排桩，排桩长度为 13.6 m，基坑周围已有建筑与基坑距离较远，基坑土层包括粘性土、化泥岩以及砂卵石等<sup>[3-5]</sup>，土层物理力学性质如表 1 所示。

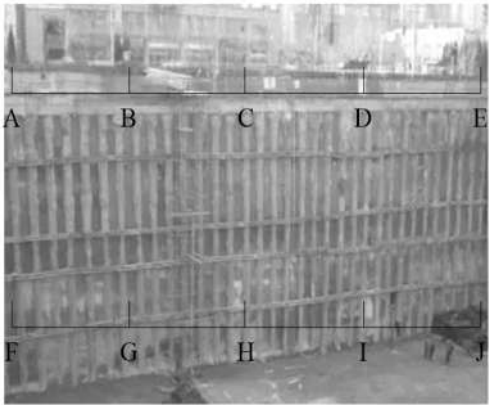


图 1 超高层建筑深基坑排桩支护结构图  
Fig.1 Deep foundation pit pile support structure of super high-rise building

表 1 基坑土层物理力学性质指标  
Table 1 Physical and mechanical properties of foundation pit soil layer

土层名称	土层厚度/m	土层重度/ (kN/m³)	土质粘聚 力/Kpa	内摩擦角/ (°)
粘性土 1	2.2	19	39	17
粘性土 2	1.2	18.5	34	13
砂卵石	1.3	21	4	37
强风化泥岩	0.8	20.5	290	29
中风化泥岩	0.7	22	590	31

该地区地下水埋藏较深且该地区抗震设防烈度较高，基本地震加速度为 0.2 g、基坑深度为 10 m。为测试超高层建筑深基坑支护结构的抗震性能，采用如图 2 所示地震模拟振动台，通过振动台模拟振动试验，测试地震作用下深基坑排桩支护结构的动力响应情况。且满足抗震安全性前提下的支护结构最大纵向位移变化量和横向位移变化量分别是 0.81 m 和 0.52 m，排桩桩身的最大位

移是 0.28 m。

## 1.2 模型建立

试验测试超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能采用的振动台为中国核动力研究设计院的大型地震模拟振动台, 该振动台尺寸为 510 × 310 mm, 其竖向和水平向振动荷载最大分别为 2.8 kg 和 28 kg。

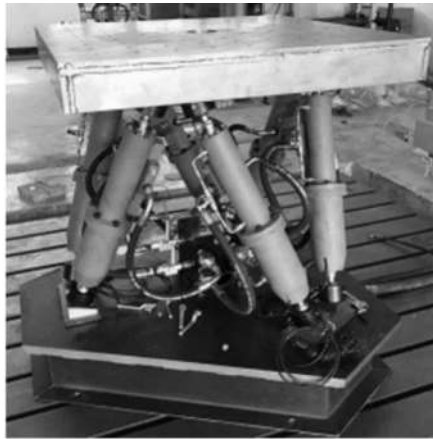


图 2 地震模拟振动台

Fig.2 Seismic simulation table

以该振动台尺寸大小、荷载以及图 1 基坑排桩支护结构为依据, 采用比例尺为 1: 100 设计尺寸大小为 260 × 210 × 210 mm 的基坑排桩支护结构振动模拟试验箱, 试验箱采用厚度为 1.5 cm 的厚木板制作, 且试验箱中基坑土质是一定比例混合的粘性土、砂卵石和泥岩。基坑排桩支护结构模型采用厚度为 0.6 cm、宽度为 20 cm, 长度分别是 15 cm、17 cm、19 cm 和 20 cm 的玻璃模拟深基坑地下深度, 试验排桩支护结构采用直径为 4 mm 长度为 14 cm 的钢筋模拟, 且在钢筋各端添加相同刚度弹簧, 采用螺母固定在试验箱木板。

## 1.3 抗震性能计算

### 1.3.1 弹性地基梁基本原理

超高层建筑深基坑排桩支护结构上部采用常规梁单元, 开挖面下部采用 Winkler 弹性地基梁单元<sup>[10-11]</sup>, 梁单元中支撑和锚杆均为弹性支撑单元, 且作用在梁单元的载荷包括冻胀力和土水压力<sup>[12]</sup>, 根据弹性地基梁有限元计算方法, 常规梁单元刚度矩阵表示为:

$$K^e = \frac{E_a I}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $K^e$  为常规梁单元刚度,  $K_a$  表示梁单元材料弹性模量;  $I$  和  $l$  分别为梁单元截面的惯性矩和长度。弹性地基梁单元刚度矩阵表示为:

$$K^d = \frac{2E_a I}{l^3} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0 & r_1 & & & & \\ & & \text{对} & & & \\ 0 & l\beta_1 & l^2\alpha_1 & & & \\ & & & \text{称} & & \\ 0 & 0 & 0 & l & & \\ & & & & & \\ 0 & -r_2 & -l\beta_2 & 0 & r_1 & \\ & & & & & \\ 0 & l\beta_2 & l^2\alpha_2 & 0 & -l\beta_1 & l^2\alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $K^d$  为弹性地基梁单元刚度,  $\alpha_1 = \frac{ch\gamma l sh\gamma l - \cos\gamma l \sin\gamma l}{sh^2\gamma l - \sin^2\gamma l} \gamma l$ ,  $\alpha_2 = \frac{ch\gamma l \sin\gamma l - \cos\gamma l \sin\gamma l}{sh^2\gamma l - \sin^2\gamma l} \gamma l$ ,  $\beta_1 = \frac{ch^2\gamma l - \cos^2\gamma l}{sh^2\gamma l - \sin^2\gamma l} (\gamma l)^2$  和  $\beta_2 = \frac{2sh\gamma l \sin\gamma l}{sh^2\gamma l - \sin^2\gamma l} (\gamma l)^2$  均为地基梁单元弹性系数,  $h$  为基坑土层厚度,  $\gamma$  为梁单元弹性特征,  $\gamma = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}}$ ,  $B$  为梁单元计算宽度, 表示土粘聚力;  $r_1$  和  $r_2$  值分别是:  $r_1 = 2(\alpha_1\beta_1 - \alpha_2\beta_2)$  和  $r_2 = 2(\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)$ 。

$K$  为深基坑排桩支护结构总刚度矩阵,  $K = K^e + K^d$  由弹性地基梁单元刚度矩阵和弹性地基梁单元刚度矩阵构成。

### 1.3.2 混凝土或压顶梁支撑

超高层建筑深基坑有混凝土做支撑, 混凝土受地震影响变形计算时将混凝土简化为相应位置处弹簧<sup>[13]</sup>, 弹簧弹性系数为:

$$K^z = \frac{E_b A}{LR} \quad (3)$$

其中,  $K^z$  为混凝土弹簧弹性系数,  $E_b$  为混凝土支撑材料弹性模量,  $A$  和  $R$  分别为混凝土截面积和支撑间距。

深基坑排桩支护结构中, 地震作用时为加固排桩整体性, 往往在排桩顶部浇灌压顶梁, 抵抗地震造成的水平土压力, 因此在测试深基坑排桩支护受地震影响产生的位移时, 需考虑压顶梁的支撑作用, 该支撑作用同样可采用弹簧模拟, 该

弹性系数为：

$$K^{wl} = \frac{24E_bI}{x^2(L-x)^2}$$

(4)

式中  $K^{wl}$  为压顶梁弹性系数， $E_b$  和  $I$  分别代表压顶梁的弹性模量和截面惯性矩，压顶梁长度为  $L$ 。压顶梁上地震作用点到端点距离为  $x$ 。

1.3.3 排桩支护结构位移计算

由排桩支护结构静力平衡条件可知，作用在深基坑排桩结构的等效结点载荷矩阵(地震作用)应与总刚度矩阵平衡<sup>[14]</sup>，当已知地震作用时，可得排桩支护结构位移，平衡方程为：

$$K\delta = R$$

(5)

其中， $R$  表示地震作用的等效结点荷载矩阵。

由于混凝土支撑会受外界因素约束，因此需对总刚度矩阵修正，可在压顶梁作用的梁单元位置处加入压顶梁弹性系数  $K^{wl}$  对总刚度矩阵修正<sup>[15]</sup>。此时超高层建筑深基坑支护结构位移  $\delta^{wl}$  表示为：

$$\delta^{wl} = F^{wl} / K^{wl}$$

(6)

由公式(6)计算可得超高层建筑深基坑排桩支护结构的地震位移结点间位移。实现超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能测试。

实际混凝土或压顶梁支撑排桩支护结构前，支撑点处的挡土结构已经发生较大变形，当采用混凝土支撑架设后支撑点挡土结构位移变化较小，

说明混凝土支撑可提升深基坑排桩支护结构的抗震能力。

2 实例分析

2.1 支护结构横向位移—纵向深度测试结果

实验采用本文方法测试图 1 深基坑排桩支护结构在不同地震强度下的支护结构横向位移—纵向深度变化。实验模拟的不同地震强度波形如图 3 所示：

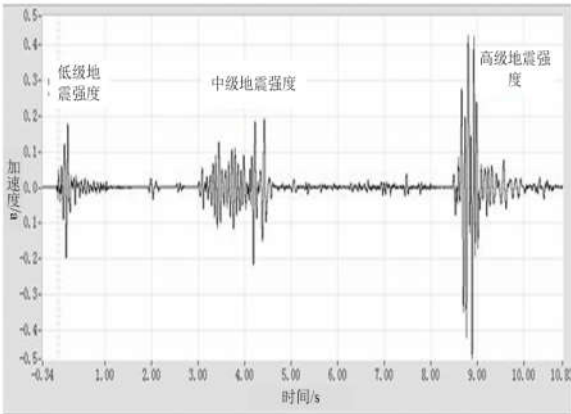


图 3 实验模拟地震强度波形图

Fig.3 Waveform of experimental simulated earthquake intensity

表 2 不同地震强度下支护结构不同位置位移—深度测试结果

Table 2 Displacement and depth test results of support structure at different positions under different earthquake intensities

基坑排桩支护结构位置	低级地震强度		中级地震强度		高级地震强度	
	纵向深度变化/m	横向位移变化/m	纵向深度变化/m	横向位移变化/m	纵向深度变化/m	横向位移变化/m
A	0.34	0.22	0.45	0.34	0.48	0.38
B	0.35	0.21	0.42	0.30	0.45	0.34
C	0.32	0.26	0.46	0.32	0.51	0.36
D	0.34	0.24	0.52	0.35	0.56	0.41
E	0.35	0.25	0.47	0.32	0.56	0.36
F	0.36	0.18	0.50	0.28	0.55	0.34
G	0.52	0.20	0.66	0.28	0.70	0.32
H	0.54	0.23	0.68	0.28	0.72	0.33
I	0.56	0.24	0.67	0.35	0.71	0.37
J	0.59	0.31	0.62	0.36	0.74	0.41

本文方法测得不同地震强度下支护结构不同位置的横向位移—纵向深度测试结果用表 2 描述：

从表 2 数据结果可知，超高层建筑深基坑排桩不同位置支护结构在不同强度地震下均发生一

定程度纵向深度和横向位移变化，本文方法测得不同支护结构位移随地震强度的增加而增加，低级地震强度时超高层建筑深基坑排桩支护结构的纵向深度和横向位移最大位移分别为 0.59 m 和

0.31 m, 中级和高级地震强度支护结构最大纵向深度和横向位移增大。但是各级地震强度下该排桩支护结构的最大纵向位移变化量和横向位移变化量始终低于标准最大纵向位移变化量和横向位移变化量 0.81 m 和 0.52 m, 说明随着地震强度的增加, 实验超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能虽然出现微弱降低趋势, 但是总体支护结构的抗震性能满足规范的安全要求。

2.2 排桩桩身位移测试结果

实验从图 1 所示的超高层建筑深基坑排桩支护结构中选择 4 个排桩点作为超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能测试分析点, 如图 4 所示:

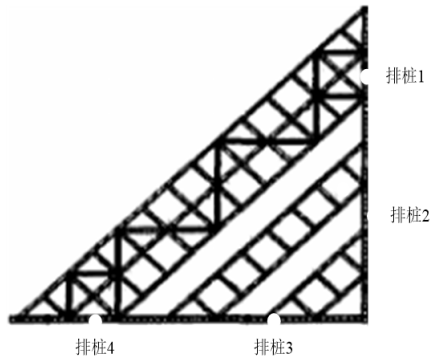


图 4 排桩布置图  
Fig. 4 Pile layout

将实验模拟不同地震强度下各排桩桩身的水平位移用表 3 描述:

表 3 不同地震强度下排桩桩身水平位移变化 (m)  
Table 3 Horizontal displacement variation of row piles under different earthquake intensity (m)

排桩位置	低级地震强度	中级地震强度	高级地震强度
1	0.14	0.18	0.24
2	0.15	0.17	0.23
3	0.15	0.18	0.24
4	0.16	0.19	0.25

从表 3 数据结果可知, 本文方法能准确测得不同地震强度下图 4 不同位置排桩的桩身水平位移变化结果,

表中数据显示随着地震强度的提高, 低级、中级和高级地震强度下排桩桩身最大位移分别为 0.16 m、0.19 m 和 0.25 m, 排桩桩身水水平位移逐渐增加, 但始终低于要求的排桩桩身的最大位移是 0.28 m, 说明排桩支护结构排桩桩身水平位移

虽然受到地震影响, 但是总体支护结构的抗震性能满足规范的安全要求。

2.3 不同施工阶段基坑排桩支护结构地震动力反应分析

考虑到基坑排桩支护结构在不同施工阶段时支护结构受地震影响存在的差异, 实验分析基坑工程在两种施工阶段下的地震动力反应特性, 超高层建筑基坑深度在 5 m 和 10 m 时的基坑模型如图 5 和图 6 所示:

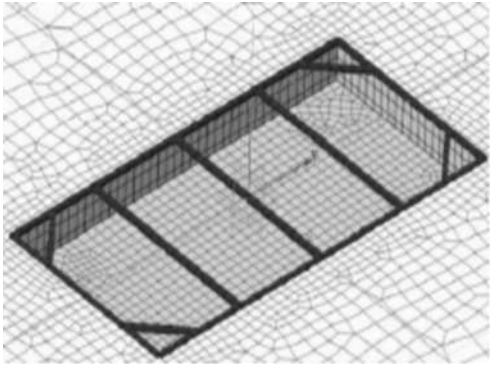


图 5 基坑开挖后 5 m 模型  
Fig.5 The 5 m model after foundation pit excavation

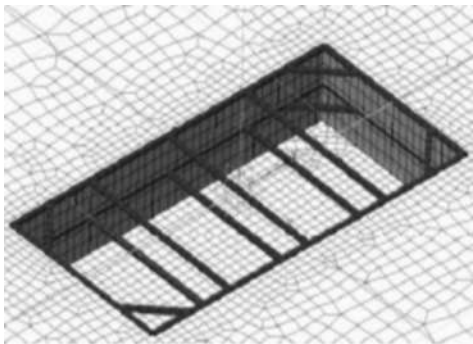
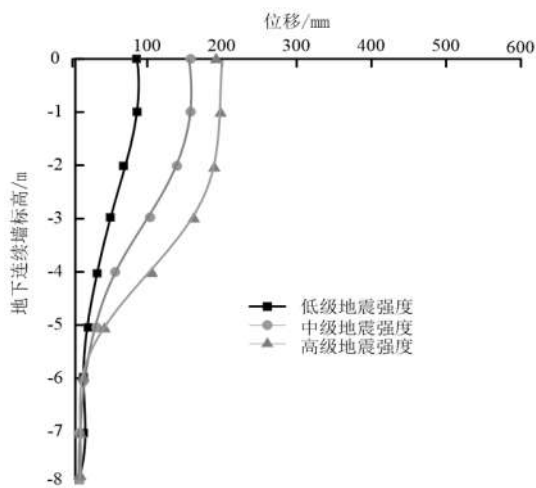


图 6 基坑开挖后 10 m 模型  
Fig.6 The 10m model after foundation pit excavation

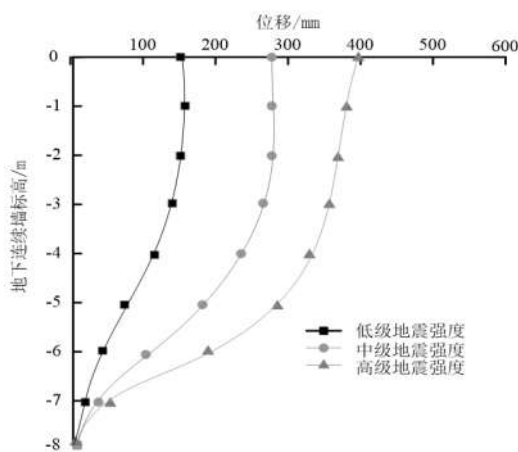
分析不同基坑施工阶段下基坑排桩支护结构的抗震性能时, 由于超高层建筑地下连续墙具有刚度大和止水效果好等优势, 是支护结构中主要采用的支护形式。因此实验以地下连续墙为抗震性测试对象, 本文方法测得不同地震加速度时的地下连续墙侧向位移结果如图 7 所示:

从图 7 可知, 超高层建筑基坑深度为 5 m 和 10 m 时, 地下连续墙侧向位移均随地震等级增大而增大, 且在相同地震强度影响下, 本文方法测得基坑深度为 10 m 时连续墙侧向位移变化均高于基坑深度为 5 m 时侧向位移变化结果。对比分析两种基坑深度下连续墙侧向位移变化结果可知,

相同地震强度影响下,基坑深度为 10 m 时的连续墙侧向位移较大,说明基坑深度达到 10 m 时,超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震稳定性差,支护结构容易发生损毁破坏,对超高层建筑安全造成极大影响。



(a) 基坑深度 5 m 时连续墙不同地震强度位移



(b) 基坑深度 10 m 时连续墙不同地震强度位移

图 7 不同地震加速度时地下连续墙侧向位移结果

Fig.7 Lateral displacement results of underground diaphragm wall at different seismic accelerations

### 3 结语

超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性能优劣直接影响建成后超高层建筑的抗震安全性,排桩支护结构抗震性强建成后建筑抵抗地震能力强,所以应对排桩支护结构实施抗震性能测试,本文通过试验测试超高层建筑深基坑排桩支护结构的抗震性能,得到不同地震强度下支护桩横向位

移—纵向深度和排桩桩身位移变化情况,地震强度越强支护结构位移变化越大,超高层建筑深基坑排桩支护结构抗震性差;且从不同深度基坑在不同地震加速度下的地下连续墙侧向位移变化结果可知,基坑深度越深地下连续墙侧向位移越大,排桩支护结构抗震性越差。

### 参考文献:

- [1] 张家国,肖世国,邹力,等. 砂卵石地层圆形深基坑排桩支护结构受力特征[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(6):1603-1610.
- [2] 屈伟,陈秋鑫,周峰,等. 不同开挖深度基坑支护设计与监测分析[J]. 建筑科学,2015,31(3):126-130.
- [3] 张家国,肖世国. 圆形深基坑排桩框架支护结构算法[J]. 冰川冻土,2016,38(4):915-921.
- [4] 陈占鹏,高伟,李永辉,等. 排桩复合土钉支护结构在深基坑工程中的应用[J]. 建筑科学,2016,32(9):114-118.
- [5] 彭文韬,魏昆. 深基坑排桩-内支撑支护结构空间变形的应用研究[J]. 工业安全与环保,2018,44(1):69-73.
- [6] 李连祥,王兴政. 考虑基坑支护结构变形模式的土压力研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(4):169-178.
- [7] 赵康,宁富金,张俊萍,等. 一种新型基坑支护结构的力学性能分析[J]. 重庆大学学报,2018,41(09):52-60.
- [8] 王建华,李江腾,廖峻. 土钉墙+排桩在明挖隧道深基坑支护中的几个问题[J]. 岩土力学,2016,37(4):1109-1117.
- [9] 曹净,钱国伟,刘海明,等. 考虑支护结构变形的基坑土压力计算[J]. 四川建筑科学研究,2016,42(4):46-49.
- [10] 程建华,王辉. 排桩与土钉联合支护结构的土压力分配机制[J]. 公路工程,2016,41(5):205-207.
- [11] 侯文萃,陈能远,高洁. 基坑排桩对建筑抗震性的影响分析[J]. 地震工程学报,2018,40(2):252-257.
- [12] 徐凌,陈格际,刘帅. 基于 FLAC3D 的深基坑开挖与支护数值模拟应用[J]. 沈阳工业大学学报,2016,38(1):91-96.
- [13] 李松,马郢,郭运,等. 双排桩与单排桩组合多级支护结构在深大基坑中的应用[J]. 长江科学院院报,2018,35(5):103-109.
- [14] 孙海霞,李冬敏,孔志鹏. 基于 ABAQUS 和正交试验法的基坑支护桩优化 [J]. 沈阳工业大学学报,2016,38(4):457-460.
- [15] 周勇,魏嵩琦,朱彦鹏,等. 兰州地区地铁车站深基坑开挖对邻近地下管道的影响分析[J]. 兰州理工大学学报,2015,41(6):120-125.