

DOI: 10.11779/CJGE2024S10045

# 钢管锚碇板桩全回收基坑支护技术及模型试验研究

李 鹏<sup>1,2,3</sup>, 刘 强<sup>\*4</sup>, 杨俊杰<sup>2,5</sup>, 吴 刚<sup>1,3</sup>

(1. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266032; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;  
3. 青岛市智慧(绿色)岩土技术创新中心, 山东 青岛 266032; 4. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;  
5. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 针对基坑工程中支护构件浪费、环境污染及高碳排放等问题, 提出了一种钢管锚碇板桩全回收基坑支护技术并介绍了支护体系构成。实施了钢管锚碇板桩的大型缩尺模型试验, 通过摄影测量技术(DIC 和 DPA)对模型板桩和管桩在开挖过程中的位移进行观测。试验结果表明: 管桩的锚拉作用对结构位移具有显著限制, 增加单位宽度的管桩数量可有效减小位移, 管桩顶部的最大位移与开挖深度呈双曲线关系。模型地基的变形破坏形式与管桩至板桩的间距有关, 随间距增加, 破坏形态从管桩与板桩同时倾斜, 到沿管桩位置滑裂, 再到沿与板桩距离开挖深度约 1.5 倍的地表滑裂。开挖过程中管桩与板桩的桩顶变形基本协调一致。

**关键词:** 钢管锚碇板桩; 全回收; 基坑支护技术; 模型试验

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0228-05

作者简介: 李 鹏(1977—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 12159565@qq.com。

## Fully recoverable retaining technology of sheet piles anchored by steel pipe piles for excavations and model tests

LI Peng<sup>1,2,3</sup>, LIU Qiang<sup>4</sup>, YANG Junjie<sup>2,5</sup>, WU Gang<sup>1,3</sup>

(1. Qingdao Surveying & Mapping Institute, Qingdao 266032, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Innovation Center of Smart(Green) Geotechnical Technology, Qingdao 266032, China; 4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 5. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology of the Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In light of the issues such as inefficiency of retaining component utilization, environmental contamination and excessive carbon emissions associated with excavation engineering, a fully recoverable retaining technology of sheet piles anchored by steel pipe piles is proposed for excavations, and the composition of the retaining system is introduced. A large-scale scale model test is conducted, and the displacements of the sheet piles and pipe piles during excavation are quantitatively measured using the photogrammetry such as DIC and DPA. The test results indicate that the anchorage action of the pipe piles imposes a significant constraint on the structural displacement, and the displacement can be effectively mitigated by increasing the number of pipe piles per unit width. The displacement at the top of the pipe pile exhibits a hyperbolic relationship with the excavation depth. The deformation and failure mechanism of the model foundation are associated with the distance between the pipe piles and the sheet piles. As the distance increases, the failure mechanism varies from the concurrent inclination of the pipe piles and sheet piles to the slippage along the pipe piles, and subsequently to the slippage along the surface area extending about 1.5 times the excavation depth from the sheet piles. The deformations at the top of both the pipe piles and the sheet pile remain consistent throughout the excavation process.

**Key words:** sheet pile anchored by steel pipe pile; full recovery; retaining technology for excavation; model test

## 0 引言

传统的以混凝土为主要建筑材料的基坑支护技术, 存在资源利用效率低、污染环境及支护结构遗留地下对后续工程造成障碍等问题。装配式、可回收技术符合国家绿色节能、低碳环保的发展理念, 是基坑

支护技术发展的重要方向<sup>[1-2]</sup>。支挡式结构是目前软土基坑支护的主要型式, 早期可回收技术的研究主要针

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078474, 51779235, 52378380)

收稿日期: 2024-05-01

\*通信作者(E-mail: sunnyseasea@163.com)

对单一结构构件, 如可回收锚杆、型钢支撑等支锚构件和组合型钢等挡土构件<sup>[3-6]</sup>, 并通过模型和现场试验总结了相关可回收构件的受力变形规律<sup>[7-8]</sup>。在此基础上, 可回收技术也逐渐实现从单一构件向空间体系的发展。随着全回收基坑支护的概念日益突出, 中国工程建设标准化协会发布了《全回收基坑支护技术规程》, 国内也陆续出台了相关地方标准, 持续构建基坑支护技术的新发展格局和实践方向。

本文研发了一种适用于软土的钢管锚锭板桩全回收基坑支护技术, 并利用模型试验研究技术参数对基坑支护体系稳定性的影响, 为构建其设计方法提供科学依据。

## 1 钢管锚锭板桩全回收基坑支护技术

钢管锚锭板桩全回收基坑支护体系由钢板桩、钢管桩、钢拉杆和钢腰梁等组成, 如图 1 所示, 所有构件在基坑回填后均可实现回收。

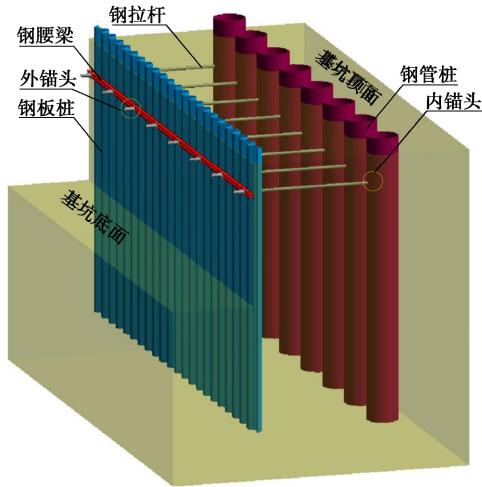


图 1 钢管锚锭板桩全回收基坑支护体系

Fig. 1 Fully recoverable retaining system of sheet piles anchored by steel pipe piles for deep excavations

钢板桩采用带有锁口的帽形型钢, 锁口可以相互组合形成连续紧密的钢结构墙体(图 2 (a)); 钢管桩作为锚锭构件, 采用大直径圆形钢管(图 2 (b)); 钢拉杆作为钢板桩和钢管桩之间的受力连接构件, 与钢管桩一一对应; 钢拉杆采用中空锚杆(图 2 (c)), 两端为螺纹锚头, 利用螺母分别与钢板桩和钢管桩连接; 钢腰梁作为钢拉杆与钢板桩之间的传力构件, 可调节钢板桩均匀受力, 采用双拼 H 型钢(图 2 (d))。

## 2 支护体系稳定性模型试验

影响支护体系稳定性的因素除土体性质外, 主要有管桩与板桩的间距、管桩的规格(长度、刚度、间距等)、板桩的规格(长度、刚度等)。因篇幅所限, 本文主要探讨管桩与板桩的不同间距对支护结构变形

的影响。



图 2 支护体系构件

Fig. 2 Component parts of retaining system

### 2.1 试验用土

模型试验用土取自青岛市上合示范核心区的海相软土, 天然密度平均值为  $1.85 \text{ g/cm}^3$ , 含水率平均值为 34.5%, 塑限和液限的平均值分别为 16.6% 和 32.4%, 塑性指数为 15.8, 属于淤泥质粉质黏土。

### 2.2 模型构件

模型板桩和管桩材料选用尼龙板和尼龙管, 按相似理论确定模型尺寸。本试验以拉森IV型钢板桩和外径 1 m、壁厚 25 mm 的钢管桩为原型, 原型与模型的长度相似比为 10。试验主要研究管桩和板桩受力后的弯曲变形及位移特点, 因而考虑模型与原型的抗弯刚度( $EI$ )相匹配。尼龙的重度  $\gamma_m = 11.5 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量  $E_m = 2.83 \text{ GPa}$ , 计算得模型板桩的厚度  $h_m$  为 17.0 mm, 模型管桩的直径  $D_m = 100 \text{ mm}$ , 壁厚  $t_m$  为 2.7 mm。拉杆采用直径 4 mm 的不锈钢棒, 两端分别与尼龙板和尼龙管栓接。

### 2.3 试验装置

试验装置包括模型箱、加载系统及监测系统 3 部分组成。模型箱体内部净尺寸长 3 m, 宽 1 m, 高 1.5 m。加载系统由气缸、加载板、反力架和空气压缩机组成(图 3)。

监测系统包括埋设模型地基内的孔隙水压力传感器、加载板位移传感器、微型薄膜土压力计, 以及数字图像相关系统(简称 DIC 系统)和摄影测量分析设备(简称 DPA 设备)(图 4)。

### 2.4 试验方案

管桩与板桩的间距  $L$  如表 1 所示。采用单根管桩时, 管桩设置于模型箱的长轴中心线上; 采用两根管桩时, 管桩间距为 300 mm, 在模型箱的长轴中心线

两侧对称布置。在满足试验边界条件的前提下, 为减少试验工作量, 同一个模型地基, 在模型箱两端各实施一个基坑开挖试验, 即 A1 与 A4、A2 与 A3、B1 与 B2 为同一个模型地基, 试验布置如图 5 和图 6。

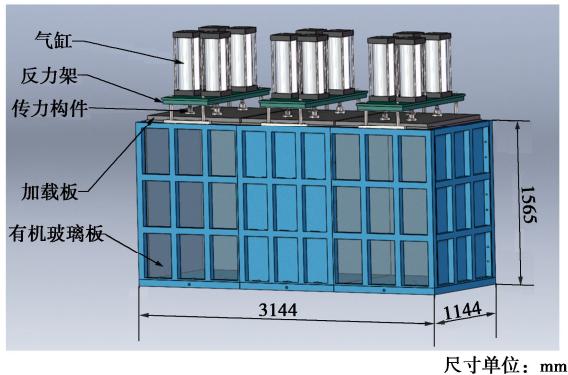


图 3 模型箱与加载系统  
Fig. 3 Model box and loading system

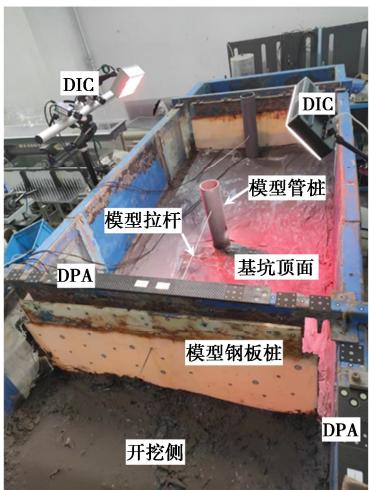


图 4 DIC 系统和 DPA 设备  
Fig. 4 DIC system and DPA facilities

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

试验编号	单管				双管	
	A1	A2	A3	A4	B1	B2
管桩与板桩间距 $L/\text{mm}$	100	300	500	1000	300	500

## 2.5 模型地基

### (1) 模型地基制作方法

模型地基采用逐级加载固结的方式制作, 前一级荷载作用下土体固结完成后施加下一级荷载。土体固结完成的判别标准是土体竖向变形速率小于  $2 \text{ mm/d}$  且超静孔隙水压力基本消散。以原状土的天然密度 ( $1.85 \text{ g/cm}^3$ ) 为目标值, 通过预备试验确定首级荷载  $2 \text{ kPa}$ 、之后每级增加  $10 \text{ kPa}$  至最终荷载  $70 \text{ kPa}$ 。

### (2) 模型地基土的物理力学性质

开挖试验结束后, 在两个试验区交界附近, 分别从模型地基深度  $20, 50, 90 \text{ cm}$  处取样, 进行密度、

含水率、直接剪切和三轴不固结不排水剪切等试验。

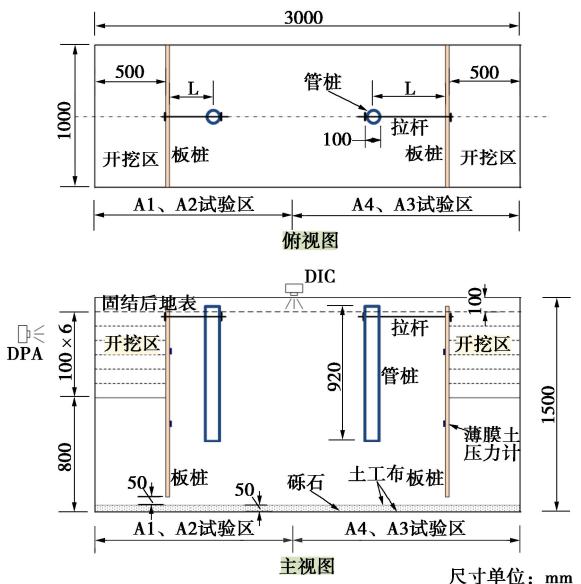


图 5 A1、A4 组及 A2、A3 组模型试验布置图

Fig. 5 Layout of model tests on case A1, A4 A2 and A3

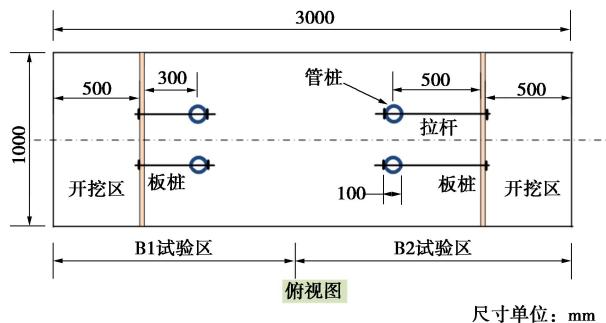


图 6 B1 和 B2 组模型试验布置图

Fig. 6 Layout of model tests on case B1 and B2

模型地基土的平均密度自上而下呈略微增大趋势, 分别为  $1.84, 1.86, 1.87 \text{ g/cm}^3$ ; 平均含水率自上而下呈“C”字型规律分布, 即上、下部排水条件较好, 含水率略低于中部, 中部含水率平均值 (32.9%) 在数值上与原状土的液限 (32.4%) 和天然含水率 (34.5%) 相近。

模型地基土的各组平均抗剪强度指标, 黏聚力  $c_q$  为  $3.0 \sim 4.8 \text{ kPa}$ 、 $c_{uu}$  为  $5.5 \sim 6.2 \text{kPa}$ ; 内摩擦角  $\varphi_q$  为  $5.6 \sim 6.0^\circ$ 、 $\varphi_{uu}$  为  $2.3 \sim 3.9^\circ$ 。抗剪强度指标变异系数较小, 均匀性较好, 且与原状土试验指标接近。

## 2.6 基坑开挖试验方法

模型地基制作完成后, 在预定的开挖区分层进行人工开挖, 每层开挖深度为  $10 \text{ cm}$ , 直至基坑顶面发生明显变形、开裂破坏, 或开挖深度达到  $50 \text{ cm}$ 。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 破坏型式

各组试验得到的基坑顶面破坏型式类似, A4 和 B2 组试验的破坏情况见图 7。对 A 组(单管桩)试验, 当两者间距为 10 cm 时, 虽地表未出现贯通滑裂面, 但板桩和管桩均发生明显变形, 滑裂面位于管桩外侧; 当间距增加为 30 cm 和 50 cm 时, 在管桩附近地表出现贯通性滑裂线, 表明桩间土形成局部塑性区并发展成贯通滑裂面; 当间距增加至 100 cm 时, 地表贯通性滑裂面出现在板桩与管桩之间, 距离板桩约 70~80 cm, 与板桩后的朗肯主动土压力区宽度基本一致。对 B 组(双管桩)试验, 其整体破坏规律与 A 组试验中管桩与板桩具有相同间距的试验结果相似。

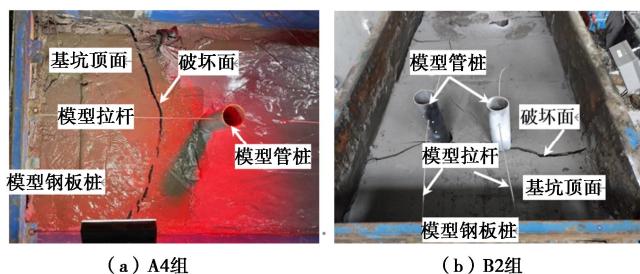


图 7 模型地基在基坑顶面的破坏状态

Fig. 7 Failure states of model foundation at top of excavation

### 3.2 土压力的变化规律

图 8 给出了 A1 和 B1 组试验中作用在板桩上的土压力变化规律。深度 0.3 m 处的两个土压力计监测的土压力值基本一致, 初始土压力值与朗肯土压力计算的静止土压力值基本一致, 土压力值随着开挖深度的增加而减小, 对应从开挖前静止土压力到开挖后主动土压力的转变。深度 0.7 m 位于开挖深度范围内, 初始土压力值亦与静止土压力计算值接近, 土压力值则随着开挖深度的增加而增加, 主要与板桩刚度较小、沿竖向反弯变形挤压土体有关。

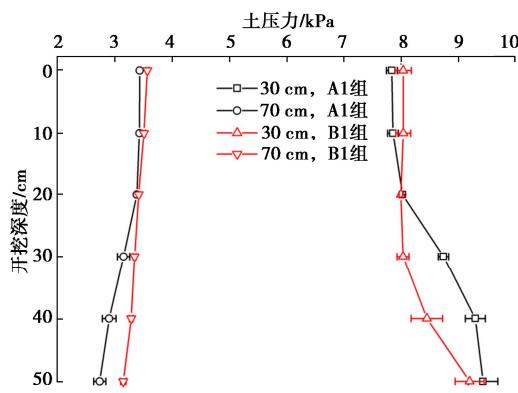


图 8 土压力变化规律

Fig. 8 Variation of earth pressure

### 3.3 管桩水平位移的变化规律

管桩顶位移随开挖深度的增加而逐渐增大, 当开挖

深度较小时接近线性变化, 在水平位移突变后仍有一定承载和抗变形能力, 总体符合双曲线变化规律, 拟合优度系数  $R^2$  均大于 0.9 (如图 9)。双曲线拟合式中位于分子的拟合参数反映了极限开挖深度, 而位于分母的拟合参数则反映了双曲线趋于渐近线的速率。试验结果显示, A1 和 A4 组的极限开挖深度基本一致, A2 和 A3 组基本一致, 而 B1 和 B2 组(双管桩)的极限开挖深度基本一致且大于管桩和板桩间距相同条件下 A2 和 A3 组(单管桩)的结果, 表明极限开挖深度和管桩与板桩间距有关, 当管桩与板桩间距超过某范围时, 两者间距越大, 同等开挖深度条件下支护体系变形越小。此外, 极限开挖深度与管桩间距成反比, 管桩间距越小, 同等条件下极限开挖深度越大。同时, 对管桩顶部水平位移的监测数据表明, 当土体发生较大变形至破坏时, 管桩发生整体倾斜。

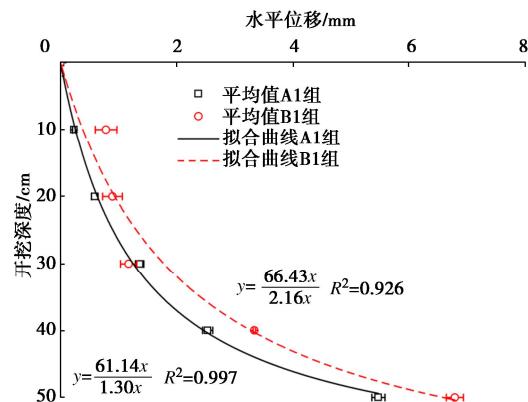


图 9 管桩顶部位移实测值

Fig. 9 Measurement of displacement at top of pipe pile

### 3.4 板桩水平位移的变化规律

图 10 给出了利用 DPA 设备获得的 A1 和 B1 组试验中的板桩顶部水平位移。板桩顶部的水平位移随开挖深度的增加而逐渐增大, 在水平方向上, 由于管桩的锚锭作用, 对 A 组(单管桩), 其值以拉杆位置为对称轴, 左右近似对称分布, 与拉杆距离越远位移越大, 呈“V”型分布且随开挖深度增加而愈加明显。对 B 组(双管桩), 其值以两根拉杆的中心线为对称轴, 左右近似对称分布。同时, B 组的桩顶位移明显小于 A 组, 管桩间距直接影响作用在板桩上的土压力, 且整体刚度的增加也有利于位移控制。

### 3.5 管桩与板桩的变形协调

将各组试验中管桩与板桩的桩顶(拉杆处)水平位移汇总比较, 如图 11 所示, 计算管桩与板桩水平位移的相关系数  $r$  为 0.96, 属显著性相关。

各组试验中管桩与板桩的变形虽然受开挖深度、施工工序等影响, 但通过拉杆作用, 拉杆两端的实测位移总体相差较小, 两者变形具有一致性。因此, 在

设计中可通过增加拉杆刚度,减小两者之间的变形差。

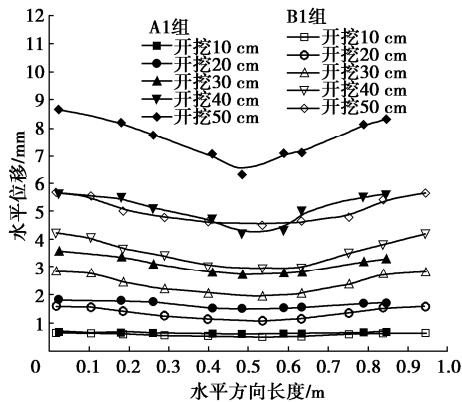


图 10 板桩顶部位移实测值

Fig. 10 Measurement of displacement at top of sheet pile

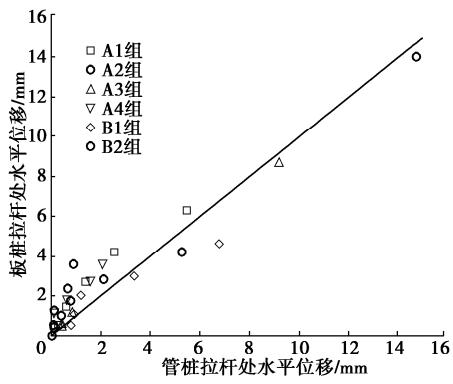


图 11 管桩与板桩的位移比较

Fig. 11 Comparison of displacements between pipe piles and sheet piles

## 4 结 论

(1) 管桩的锚拉对结构位移具有显著限制作用。管桩顶部最大水平位移与开挖深度成双曲线关系。双管桩条件下的板桩位移明显小于单管桩条件下的结果,即增加板桩单位宽度内的管桩数量可以有效减小支护体系的位移。

(2) 模型地基的变形破坏形式与管桩至板桩的间距有关。两者间距较近时,主动滑裂面的发展受到管桩限制,沿管桩位置滑裂。两者间距足够远时,滑裂面沿与板桩距离开挖深度约 1.5 倍的地表滑裂。

(3) 管桩与板桩顶部的位移总体相差较小,两者的变形具有一致性。设计中可将两者的变形协调做为假定条件,以求解杆件体系力学平衡微分方程。

## 参考文献:

- [1] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (GONG Xiaonan. Manual for Design and Construction of Deep Foundation Pit Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))

- [2] 李连祥, 赵仕磊, 张菊连, 等. 全回收基坑支护技术发展及思考展望[J/OL]. 工业建筑, <https://doi.org/10.13204/j.gjzG23022605>. (LI Lianxiang, ZHAO Shilei, ZHANG Julian, et al. Development and thinking prospect of full recycled retaining and protection of foundation excavations engineering[J/OL]. Industrial Construction, <https://doi.org/10.13204/j.gjzG23022605>. (in Chinese))
- [3] 龚晓南, 俞建霖. 可回收锚杆技术发展与展望[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 90-96. (GONG Xiaonan, YU Jianlin. Development and prospect of removable anchor technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 90-96. (in Chinese))
- [4] 付文光, 邹俊峰, 黄凯. 可回收锚杆技术研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 1): 512-522, 528. (FU Wenguang, ZOU Junfeng, HUANG Kai. Overview of research on recycled anchor technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 512-522, 528. (in Chinese))
- [5] 王卫东, 丁文其, 杨秀仁, 等. 基坑工程与地下工程: 高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 78-98. (WANG Weidong, DING Wenqi, YANG Xiuren, et al. Deep excavation engineering and underground engineering—new techniques of high-efficiency and energy-saving, low environmental impact, and sustainable development[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(7): 78-98. (in Chinese))
- [6] 张超哲, 刘松玉. 地下空间预制装配式结构研究现状综述[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(1): 236-245. (ZHANG Chaozhe, LIU Songyu. A review on the research of prefabricated structures in underground space[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(1): 236-245. (in Chinese))
- [7] 王锐松, 郭成超, 林沛元, 等. 富水粉土基坑装配式可回收支护开挖响应分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 843-853. (WANG Ruisong, GUO Chengchao, LIN Peiyuan, et al. Excavation response analysis of prefabricated recyclable support structure for water-rich silt foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 843-853. (in Chinese))
- [8] 周盛全, 戴晨, 冯绍童, 等. 可回收桩锚支护基坑模型试验及数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(11): 92-98. (ZHOU Shengquan, DAI Chen, FENG Shaotong, et al. Model test and numerical simulation of recoverable Pile-anchor[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(11): 92-98. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)