

文章编号: 1007-2993(2025)01-0072-10

# 成都某膨胀土地区支挡结构受力特征研究

孟宝华<sup>1</sup> 马京京<sup>2</sup> 邓宇<sup>3</sup> 王宁<sup>4</sup>

(1. 绵阳市第三人民医院 四川省精神卫生中心 基本建设科, 四川绵阳 621000; 2. 绵阳城市学院 现代技术学院, 四川绵阳 621000; 3. 中冶成都勘察研究总院有限公司, 四川成都 610023; 4. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川绵阳 623000)

**【摘要】** 成都某膨胀土基坑采用 h 型双排桩+锚索支护, 采用 FLAC 3D 对支护结构进行数值模拟, 并从桩排间距、桩顶高差及桩底高差方面进行分析优化。分析结果表明: 排距小于  $5d$  ( $d$  为桩径) 时, 增加排距会使桩身受力分布趋向合理; 随前排桩顶降低, 后排桩分担弯矩和剪力增加, 但后排桩剪力最大值小于前排桩; 随后排桩桩底提高, 后排桩弯矩和剪力急剧减小, 并出现不合理分布。根据数值分析结果对该工程 h 型双排桩设计进行了优化, 同时在前后排桩连系梁间设置支撑盲沟, 于桩间设置仰斜式泄水孔, 有效地减弱了膨胀土在大量卸荷后发生松弛, 避免了膨胀土因含水量增加抗剪强度降低带来的不利影响。基坑监测数据表明基坑变形控制效果较好, 同时验证了数值分析模型的合理可靠性。

**【关键词】** 深基坑; 膨胀土; 变形监测; FLAC 3D; 双排桩

**【中图分类号】** TU432

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0806

## Mechanical characteristics of retaining structure in an expansive soil area of Chengdu

Meng Baohua<sup>1</sup> Ma Jingjing<sup>2</sup> Deng Yu<sup>3</sup> Wang Ning<sup>4</sup>

(1. Capital Construction Division, The Third Hospital of Mianyang, Sichuan Mental Health Center, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2. College of Modern Technology, Mianyang City College, Mianyang 621000, Sichuan, China; 3. Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu 610023, Sichuan, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 623000, Sichuan, China)

**【Abstract】** In a foundation pit located in an expansive soil area in Chengdu, an h-type double-row pile + anchor cable support system was employed. FLAC 3D was used to conduct numerical simulations analyzing the effects of varying pile row spacing, and differences in pile top and bottom elevations. The analysis shows that when row spacings are less than five times the pile diameter ( $5d$ ), increasing the spacing leads to more reasonable force distribution on the piles. As the top of the front pile decreases, the bending moment and shear force shared by the rear pile increase, yet its maximum shear force remains lower than that of the front row. Elevating the rear row pile bottom resulted in a sharp decrease and misallocation of its bending moment and shear force. Based on these findings, the h-type double-row pile design was optimized by adding supporting blind ditches between tie beams and inclined drainage holes between piles, effectively mitigating expansive soil relaxation and preventing shear strength reduction due to moisture increases. Monitoring data confirmed effective deformation control and validated the reliability of the numerical model.

**【Key words】** deep excavation; expansive soil; deformation monitoring; FLAC 3D; double row pile

### 0 引言

成都东郊膨胀土广泛发育, 基坑采用常规桩锚支护效果欠佳, 加之基坑周边环境愈来愈复杂, 对该区基坑支护结构的设计与施工提出了更高要求<sup>[1-2]</sup>。国内外针对膨胀土地区基坑支护结构的研究主要集

中于囊式扩体锚索、双排桩、桩+斜撑等方面。Sawaguchi<sup>[3]</sup>对双排桩侧移特性进行理论分析, 提出计算方法并通过模型试验予以验证。申永江等<sup>[4]</sup>利用 ANSYS 对双排桩+锚索复合支挡结构和刚架双排桩进行研究, 结果表明, 前者前后排桩之间的内力分

**基金项目:** 中冶成都勘察研究总院有限公司科研课题(ZYCK, 2021-003); 绵阳市第三人民医院 2022 年科研立项课题(202243)

**作者简介:** 孟宝华, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事医院基建项目设计及运行管理工作。E-mail: 1032785236@qq.com

布间隙较为明显,而后者的内力分布间隙较小,能更好发挥抗滑作用。薛光桥<sup>[5]</sup>证明连系梁可明显减小门架式双排桩支护结构位移,并结合理正计算结果对双排桩计算模型进行改进。岳大昌等<sup>[6]</sup>通过对成都某膨胀土基坑变形监测及加固处理,指出潜孔钻工艺因加入压缩空气导致土体裂缝贯通加剧。袁贵兴等<sup>[7]</sup>通过对比桩+普通锚索、桩+囊式扩体锚索及桩+内支撑支护形式,证明了复合式支护结构体系的经济性与安全性。

当前虽有文献对分级双排桩模型及现场试验进行了研究<sup>[8-14]</sup>,但针对复合式支护结构的研究<sup>[15-17]</sup>还相对较少,针对膨胀土地区基坑采用双排桩+锚索的复合式支护结构的相关研究更少。为此,本文以成都膨胀土区域基坑为例,基于现场数据采集及FLAC 3D数值分析结果,对基坑复合式支护结构受力特征进行研究,并提出优化措施。

### 1 项目概述

#### 1.1 工程简介

项目位于成都东郊某医院院区内,项目±0.00标高为525.10~525.60 m,设1~3层地下室,基坑周长约600 m,基坑深2.5~15.8 m。基坑北侧临近医院

已有建筑物,最近处距坑边约3.6 m,该建筑为独立基础,基础埋深约9 m;基坑东侧紧临原门诊综合楼,门诊综合楼采用桩基础,基础桩桩底标高约511.70 m,边缘基础桩紧临基坑上口(见图1)。



图1 基坑现场照片(镜向东)

#### 1.2 工程地质和水文地质条件

场地地貌属成都冲洪积平原岷江水系Ⅲ级阶地。场地自上而下地层为人工填土、黏土及泥岩(全风化—中等风化)。人工填土中杂填土为新近人工堆积,素填土以黏性土为主,局部呈软塑状;黏土褐黄色,可塑—硬塑,含少量铁、锰质氧化物、钙质结核,局部富集,同时含少量灰白色高岭土条带及斑痕,干裂、遇水易分解,弱膨胀性。场地地下水为基岩裂隙水、上层滞水,水位不稳定。典型地质剖面见图2,主要地层物理力学参数见表1。

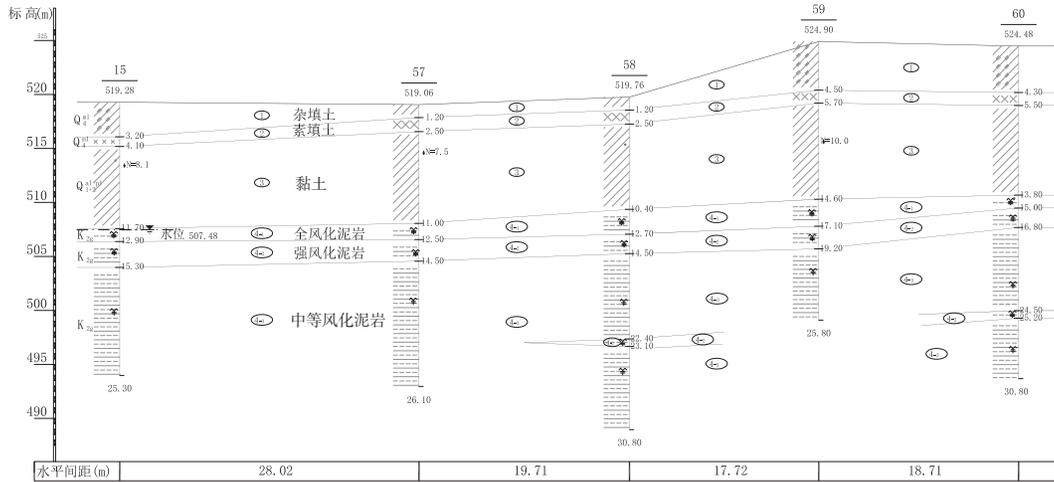


图2 基坑典型地质剖面图

表1 主要地层物理力学参数

地层名称	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa	与锚固体粘结强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	层厚/m
①杂填土	18.0		2.0*	16	5.0	8.0	0.5~5.2
②素填土	19.0		3.0*	18	8.0	10.0	0.5~4.2
③黏土	20.0	200	10.0	50	20.0	12.0	0.7~13.1
④ <sub>1</sub> 全风化泥岩	19.0	180	8.0	65	25.0	16.0	
④ <sub>2</sub> 强风化泥岩	22.5	300	20.0	120	30.0	25.0	
④ <sub>3</sub> 中等风化泥岩	23.5	750	45.0*	260	110.0*	32.0*	

注:带\*数据为经验值。

## 2 支护结构方案

基坑支护平面布置见图3。如图3所示,根据各区基坑深度及周边环境特点,有针对性地对基坑分别采用放坡+锚喷、排桩、排桩+支撑及双排桩+锚索支护。基坑东侧中段紧临门诊综合楼,对应区域基坑深度15.0 m,该段(图3中GH段)采用h型双排桩+锚索复合支护结构。双排桩桩径均为1.80 m,排内桩间距2.30 m,排间距4.50 m,h型双排桩前短后长,后排桩冠梁顶面位于自然地面,桩长25.8 m,前排桩冠梁顶面位于自然地面下5.0 m,桩长20.8 m,冠梁及刚架梁截面尺寸均为1.80 m(宽)×1.20 m(高),自然地面下10.50 m设置1道锚索,锚索孔径400 mm,锁定值350 kN。该段支护剖面见图4。

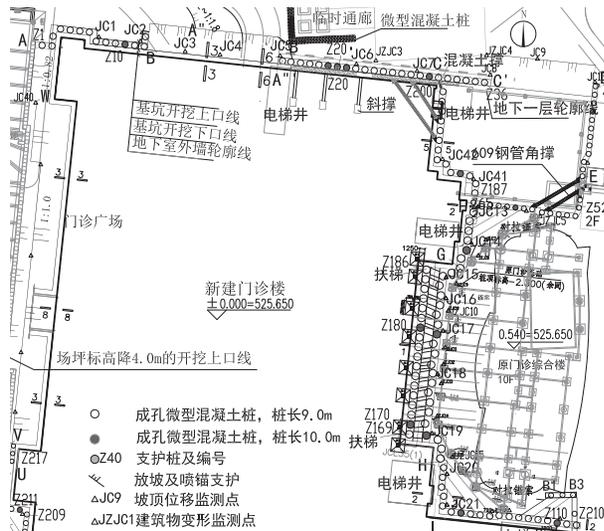


图3 基坑支护平面布置图

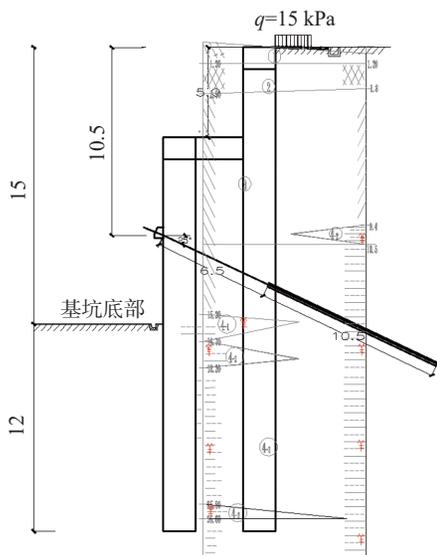


图4 GH段支护剖面示意图(单位:m)

基坑地下水采用明排处理措施,坑顶5 m范围地表硬化处理,严防地表水下渗。

## 3 基坑变形分析

### 3.1 复合式支护结构数值模型

假设土体为弹塑性体,桩、冠梁及连梁之间采用刚性连接,只传递弯矩不发生转动。基坑开挖前已降水至基底以下0.5 m,基底附近为基岩,因此模型未考虑渗流和地下水的影响。模型材料及参数选取如下:

#### (1) 土体

土体采用莫尔-库仑本构模型。开挖部分采用空模型。

#### (2) 桩单元

桩结构单元需要通过材料参数、几何参数及耦合弹簧参数定义;适用于模拟法向和轴向都有摩擦作用的基桩;桩土接触面的剪切、法向作用主要就是自然黏结和摩擦。

#### (3) 腰梁及连梁采用梁单元

腰梁及连梁采用梁单元参数如表2所示。

表2 材料物理力学参数

模型材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
桩单元	2400	30	0.30
梁单元	2200	25	0.25

#### (4) 锚单元

锚索直径为0.4 m,自由段为6.5 m,锚固段为10.5 m,倾角为 $25^\circ$ ,间距同桩间距。自由段弹性模量为 $2.10\times 10^{11}$  Pa,锚固段弹性模量为300 MPa,土体黏聚力为200 kPa,内摩擦角为 $35^\circ$ 。

#### (5) 桩土耦合弹簧

桩与实体单元剪切耦合弹簧刚度、黏聚力、内摩擦角分别为 $1.3\times 10^{11}$  Pa,  $1.3\times 10^{10}$  Pa,  $10^\circ$ ;法向耦合弹簧刚度、黏聚力、内摩擦角分别为 $1.3\times 10^9$  Pa,  $10^5$  Pa, 0。

坑顶设计荷载15 kPa,作用宽度为一倍基坑深度,分步模拟开挖,第一步基坑分层开挖至地面以下5 m处,建立前排桩冠梁和连梁;第二步分层开挖至锚索腰梁以下0.5 m处,即10.5 m;第三部开挖至基底。支撑体系模型见图5。

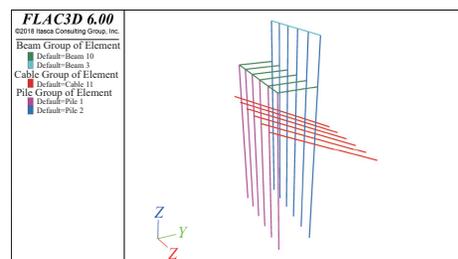


图5 支撑体系模型图

### 3.2 膨胀力考虑

《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112-2013)对膨胀力是何种荷载形式无明确规定,只在 5.2.14 条给出地基土涨缩变形量经验公式。由于详勘报告中提供膨胀力是室内试验环境下,将膨胀土(岩)完全浸泡在水中产生的值,与实际情况有所不同。成都地区设计计算中对膨胀力的考虑主要有以下两种处理方式:

(1)普遍采用对膨胀土力学指标进行折减,综合内摩擦角按勘察指标的 0.8 倍或 0.7 倍进行计算<sup>[2]</sup>。

(2)将膨胀力作用的内力值与常规土压力作用下支护结构的内力叠加,用不同的叠加值对支护结构进行验算,取最不利结果对支护结构进行设计<sup>[7]</sup>。

结合《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112-2013)5.2.14 条公式及当地经验,在数值模拟中采用第二种计算方法。

成都地区膨胀土中的黏土矿物成分以伊利石、蒙脱石为主,夹少量石英和高岭土,亲水性强、胀缩性大,其下伏白垩系红色页岩风化层在化学成分中含铝土(氧化铝)多,饱水后的抗剪强度较低,内摩擦角  $4^{\circ} \sim 9^{\circ}$ ,黏聚力  $4 \sim 16 \text{ kPa}$ <sup>[18]</sup>。该类岩土因具有膨胀性,在卸荷下将发生松弛,使得岩土体含水率逐渐增大,是基坑或边坡坍塌的主因<sup>[18]</sup>。故结合当地经验,项目在实施过程中增设了直径 20 cm 的仰斜式泄水孔,在前后排桩连系梁之间增设支撑盲沟,避免松弛后岩土含水率增大威胁基坑安全。

## 4 复合式结构优化

项目实施过程中,采用 FLAC 3D 对 h 型双排桩+锚索支护结构位移及受力情况进行探究,并根据优化后的结构实施。

### 4.1 排间距变化影响及分析

排间距分别按  $3d$ ,  $4d$ ,  $5d$ ,  $6d$ ,  $7d$  ( $d$  为桩直径)五种工况进行模拟,各工况下桩身水平位移变化情况见图 6。排间距从  $3d$  增至  $7d$ ,桩顶位移变化:前排桩从 9.49 mm 降至 6.89 mm,减小约 38%,后排桩从 15.2 mm 降至 13.1 mm,减小约 16%。排间距  $5d$  增至  $7d$  时,桩顶位移变化不明显。

各排间距工况下桩身弯矩变化情况见图 7。排间距从  $3d$  增至  $7d$ ,桩身最大正弯矩变化:前排桩从 1510  $\text{kN}\cdot\text{m}$  降至 1480  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,减小约 3%,后排桩从 239  $\text{kN}\cdot\text{m}$  降至 195  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,减小约 22%;最大负弯矩变化:前排桩从 -1410  $\text{kN}\cdot\text{m}$  降至 -1340  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,减小约 6%,后排桩从 -1940  $\text{kN}\cdot\text{m}$  降至 -1650  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,减小约 18%。

各排间距工况下桩身剪力变化情况见图 8。排

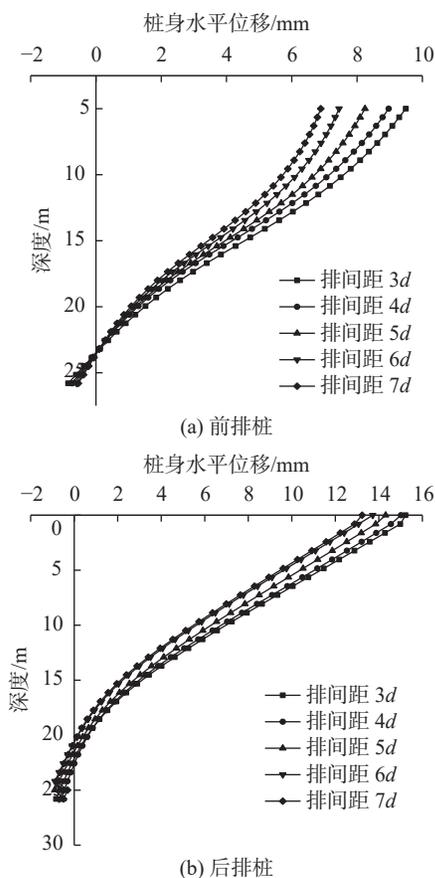


图 6 排间距对排桩位移的影响

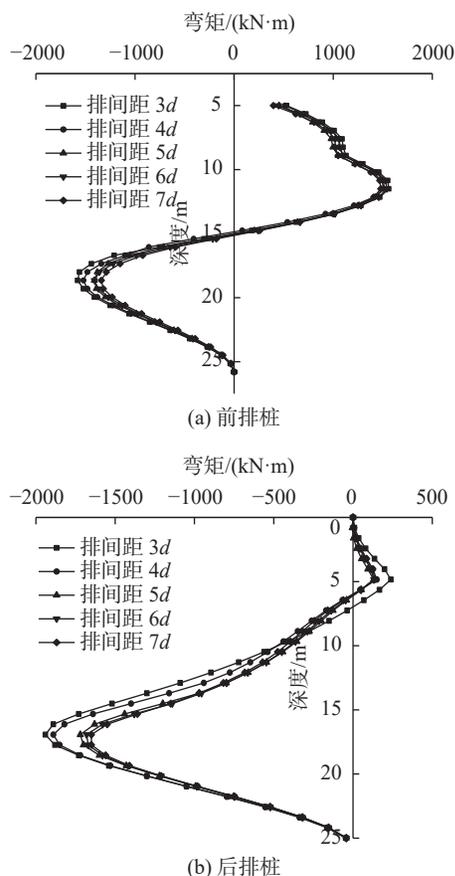


图 7 排间距对排桩弯矩的影响

间距从 3d 增至 7d, 最大正剪力变化: 前排桩从 289 kN 降至 279 kN, 减小约 4%, 后排桩从 316 kN 降至 290 kN, 减小约 9%; 最大负剪力变化: 前排桩从 -729 kN 降至 -672 kN, 减小约 9%, 后排桩从 -273 kN 降至 -259 kN, 减小约 6%。

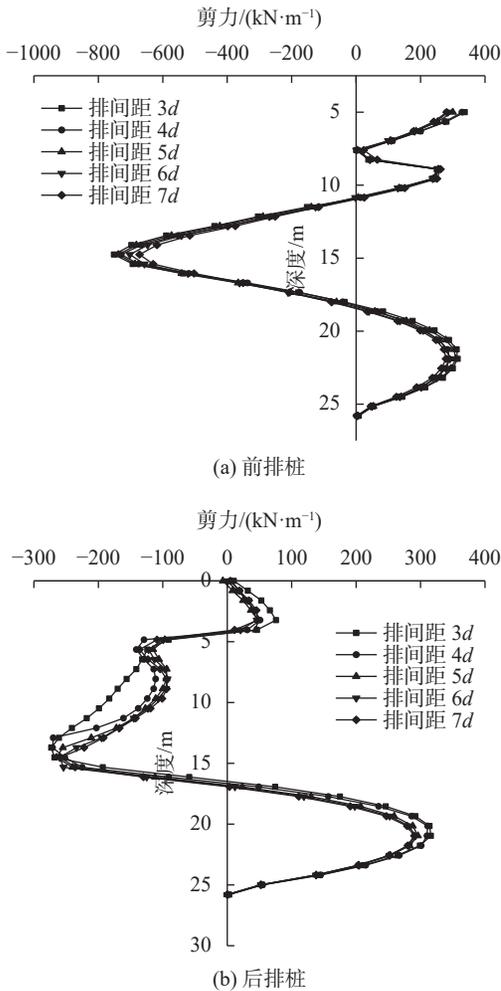


图 8 排间距对排桩剪力的影响

各排间距工况下锚索轴力变化情况见图 9。排间距从 3d 增至 7d, 预应力锚索轴力从 754 kN 降至 670 kN, 减小约 12.5%。

综上, 随着双排桩排距增加, 前后排桩桩顶水平位移、桩身弯矩及剪力均不同程度减小, 一定程度上增加排间距对支挡结构受力有利, 此时桩身弯矩及剪力的分布也较为合理, 前后排桩之间的桩间土更能发挥土拱效应。但随排间距继续增大, 前后排桩位移、弯矩及剪力变幅不大, 并且前后排桩之间连梁的受力效果逐渐减弱, 传递弯矩能力也会随之减弱, 反而使前后排桩受力不均匀, 进而使桩内力变大。这与申永江等<sup>[4]</sup>研究结果不尽一致, 或与其研究未考虑桩土共同作用有关。结合支护桩受力及变形特征, 综合考虑

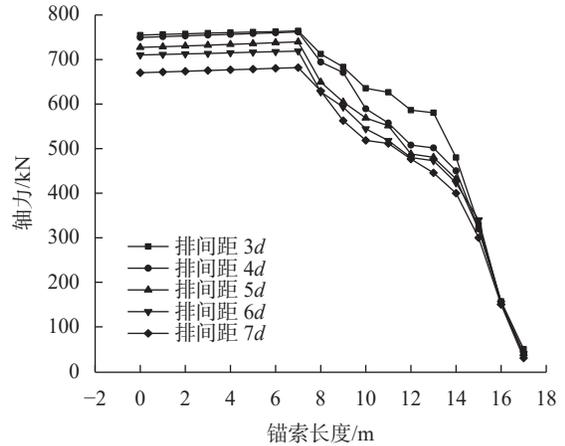


图 9 排间距对锚索轴力的影响

桩作业面、桩周边环境条件、施工造价等因素, 本工程排间距建议值为 3.2d。

#### 4.2 桩顶高差变化影响及分析

将前后排桩顶高差作变量对双排桩+锚索支护结构进行研究。桩顶高差分别设置成前排桩较后排桩桩顶低 0, 1, 2, 3, 4, 5 m 六种工况, 各桩顶高差工况下桩身位移变化情况见图 10。桩顶高差由 0 m 增

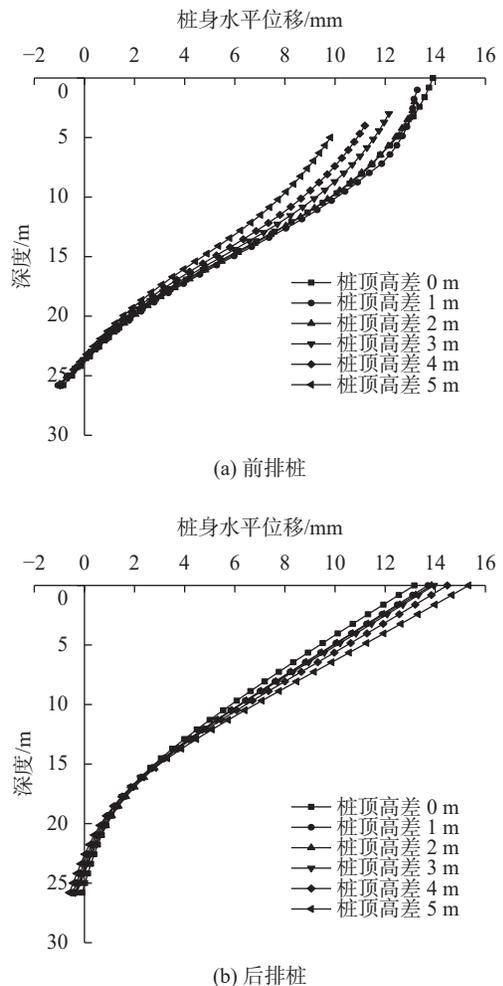


图 10 桩顶高差对排桩位移的影响

至 5 m, 桩身最大位移变化: 前排桩从 13.9 mm 降至 9.8 mm, 减小约 41%; 后排桩从 13.8 mm 增至 15.3 mm, 增大约 11%。

各桩顶高差工况下桩身弯矩变化情况见图 11。由图 11 可见, 前排桩最大正弯矩发生在基坑中上部, 最大负弯矩发生在基坑底部以下约 2 m 处, 桩顶高差由 0 m 增至 5 m, 前排桩最大正弯矩从 2040 kN·m 降至 1500 kN·m, 减小约 36%, 最大从 -1960 kN·m 降至 -1380 kN·m, 减小约 42%。桩顶高差为 0 m 时后排桩桩身弯矩均为负值, 最大值约为 -1590 kN·m, 随桩顶高差增加, 后排桩开始出现正弯矩, 在连梁处出现“拐点”, 最大负弯矩不断增加, 其值从 -1590 kN·m 增至 -1950 kN·m, 增大约 18.4%。

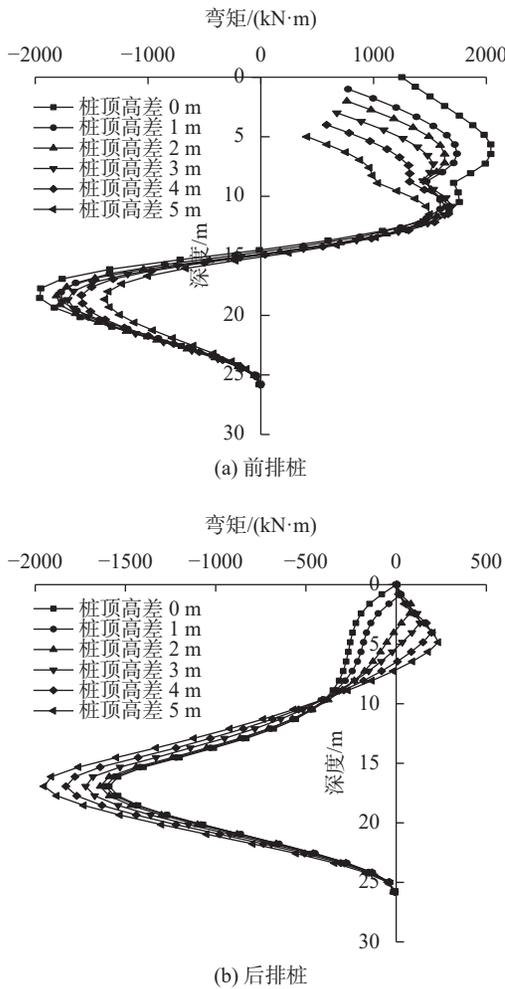


图 11 桩顶高差对前排桩弯矩的影响

各桩顶高差工况下桩身剪力变化情况见图 12, 前后排桩最大正剪力发生在桩底以上约 4 m 处, 桩顶高差由 0 m 增至 5 m, 前排桩最大正剪力从 382 kN 降至 282 kN, 减小约 35%, 后排桩最大正剪力从 258 kN 增至 313 kN, 增大约 18%。前后排桩最大负剪力发生在坑底, 桩顶高差由 0 m 增至 5 m, 前排桩

最大负剪力从 -868 kN 降至 -724 kN, 减小约 16%, 后排桩最大负剪力从 -243 kN 增至 -272 kN, 增大约 11%。

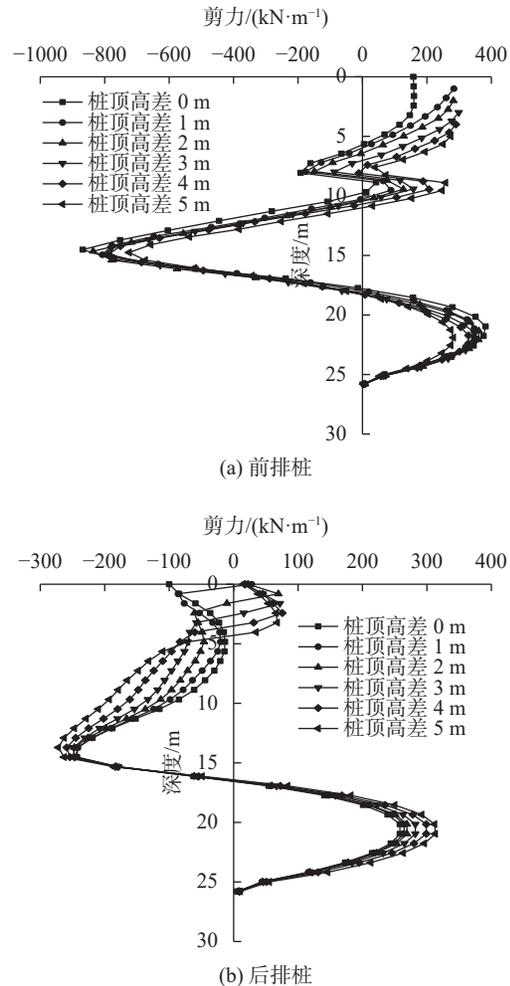


图 12 桩顶高差对前排桩剪力的影响

各桩顶高差工况下锚索轴力变化情况见图 13, 随桩顶高差由 0 m 至 5 m 不断增大, 锚索轴力从 737 kN 降至 683 kN, 减小约 7%。

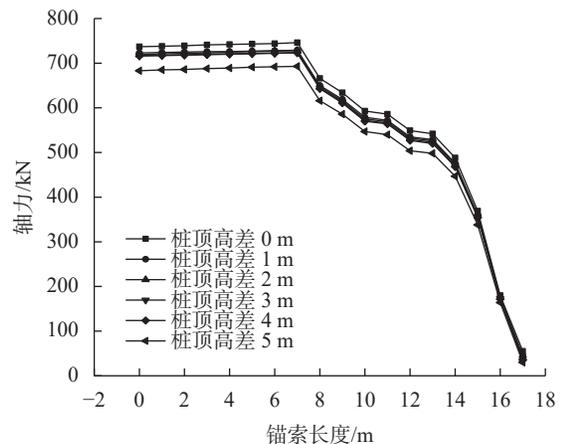


图 13 桩顶高差对锚索锚固力的影响

综上所述,随前后排桩桩顶高差不断增加,前排桩弯矩和剪力的极值均不断减小,后排桩剪力和弯矩的极值在不断增加,后排桩分担弯矩和剪力逐渐增大。 $h$ 型双排桩复合支护结构的剪力对桩顶高差敏感性小于弯矩。因此, $h$ 型双排桩复合结构内力分布更合理,利于发挥桩身材料性能。综合考虑桩顶高差采用5 m。

### 4.3 桩底高差变化影响及分析

将前后排桩底高差作变量对双排桩+锚索支护结构进行研究。桩底高差分别设置成后排桩较前排桩桩顶低0, 2, 4, 6, 8 m五种工况,各桩底高差工况下桩身位移变化情况见图14。随后排桩桩底标高上调,前后排桩桩身位移均不断增大,前排桩最大位移从9.8 mm增至13 mm,增大33%,后排桩从15.3 mm增至21.2 mm,增大39%。

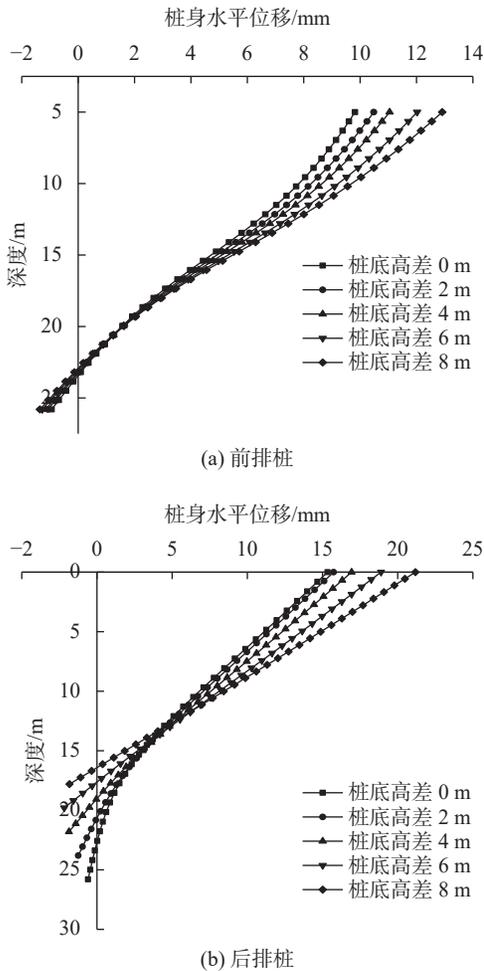


图14 桩底高差对前排桩位移的影响

各桩底高差工况下桩身弯矩变化情况见图15。前后排桩最大负弯矩均发生在基底以下约2 m处,随后排桩桩底标高上调,前排桩最大正弯矩从1500 kN·m降至1290 kN·m,减小14%,最大负弯矩从

-1380 kN·m增至-1830 kN·m,增大33%;后排桩最大正弯矩从238 kN·m降至230 kN·m,减小3%,最大负弯矩从-1950 kN·m降至-50 kN·m,减小97%。

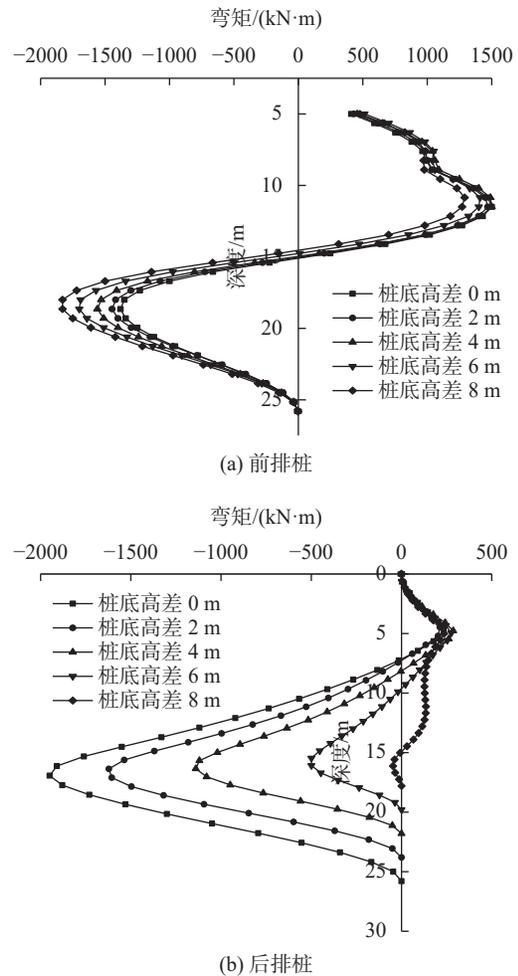


图15 桩底高差对前排桩弯矩的影响

各桩底高差工况下桩身剪力变化情况见图16。前排桩最大剪力在基底,随后排桩桩底标高上调,从282 kN增至290 kN,增大3%,后排桩最大正剪力从313 kN降至80 kN,减小75%;前排桩最大负剪力从-724 kN增至-786 kN,增大9%;后排桩从-272 kN降至-55 kN,减小80%。

各桩底高差工况下锚索轴力变化情况见图17。随后排桩桩底标高上调,锚索轴力由683 kN增至720 kN,增大约6%。

综合上述数据分析,随桩底高差增大,后排桩弯矩和剪力急剧减小出现不合理分布,支撑结构的受力转移到前排桩,支护结构顶部水平位移增加,后排桩发挥作用减小明显,最终导致后排桩失效。随桩底高差增大,无论桩顶位移、弯矩还是剪力,前排桩变化幅度最大约33%,说明该复合支护结构有较大的安全储备,这与悬臂双排桩的受力机制不同。因此根据

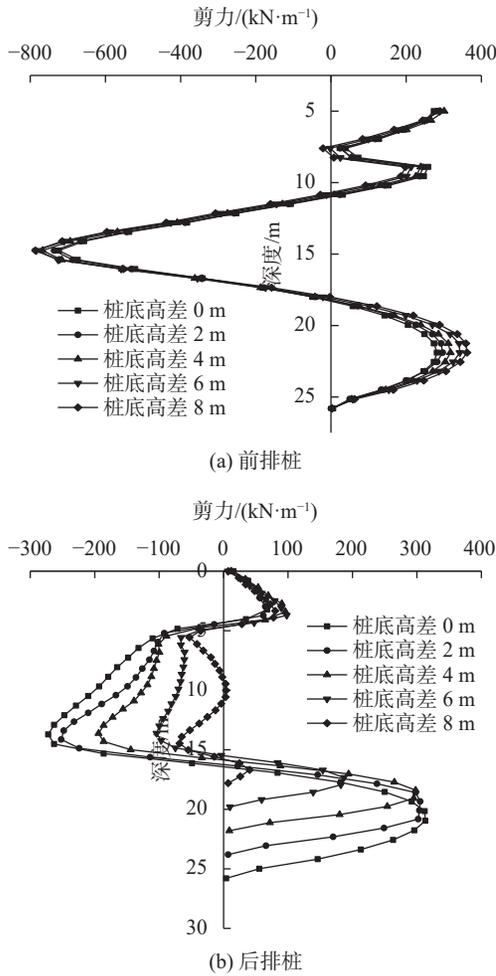


图 16 桩底高差对排桩剪力的影响

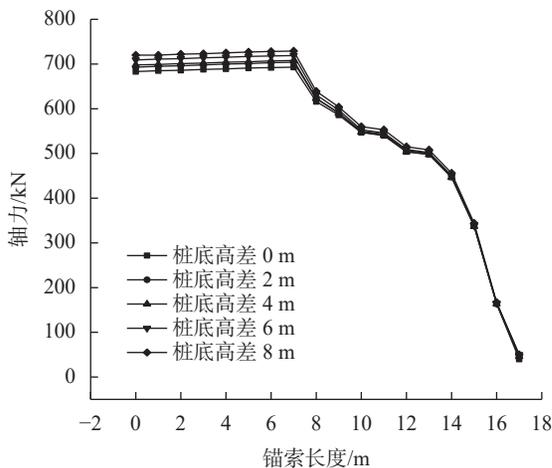


图 17 桩底高差对锚索轴力的影响

《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012)中单支点支护结构最小嵌固深度要求,本工程后排桩底部较前排桩高 4 m 时,前后排桩桩身内力分布较合理,且位移满足规范要求。

4.4 优化后工况选取及模拟效果验证

根据三维数值模拟,从排间距、桩顶高差及桩底

高差 3 个方面对支护结构进行优化分析,优化前后的支护设计参数见表 3。

表 3 支护结构优化前后参数

桩参数	工况	
	优化前	优化后
桩排间距	3.0d	3.2d
桩顶高差	4.0 m	5.0 m
桩底高差	0 m	4.0 m

优化后基坑开挖至不同工况时前后排桩桩顶位移模拟值与实测值对比情况见图 18。开挖至坑底后,前排桩桩顶水平位移模拟值与实测值分别为 9.8 mm 和 10.8 mm,后排桩对应数值分别为 15.4 mm 和 17.1 mm,均符合现行基坑监测规范要求。数值模拟曲线与实测曲线变化趋势一致,经对比,前排桩桩顶位移模拟与实测值差值约 9.3%,后排桩相差约为 10%,表明数值分析模型合理可靠。

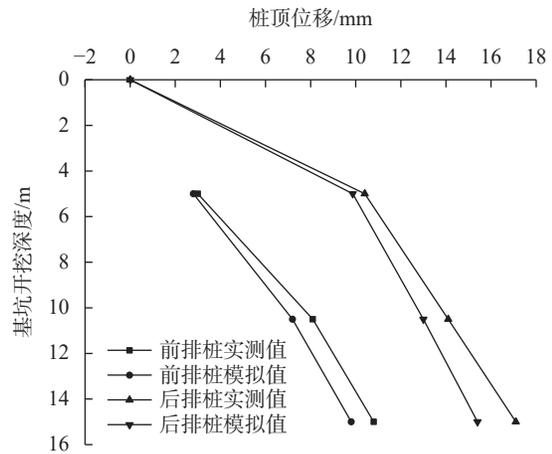


图 18 双排桩桩顶位移模拟、实测对比图

5 结论

在建立 h 型双排桩+锚索复合支挡结构数值模型基础上,结合成都某膨胀土基坑实例,通过改变其排间距、桩顶高差、桩底高差等,对其桩身位移及受力进行分析,提出优化方案建议。结论如下:

(1)排距小于一定限值,增加排间距对支挡结构受力有利,此时桩身弯矩及剪力的分布也较为合理,前后排桩之间的桩间土更能发挥土拱效应。随着排距超过一定限值,前后排桩之间连梁的受力效果逐渐减弱,传递弯矩能力也随之减弱,前后排桩受力不均匀,进而使桩内力变大。

(2)h 型双排桩复合支护结构桩顶位移对桩顶高差的敏感性小于弯矩和剪力,前后排桩弯矩、剪力及抵抗变形能力较长双排桩分担更合理,利于发挥桩

身材料性能。

(3)随桩底高差增大,后排桩弯矩和剪力急剧减小出现不合理分布,发挥作用减小明显。h型双排桩复合支护结构前排桩有较大安全储备,可进一步对其优化。前后排桩桩顶高差超过4m,桩顶位移增速加快,应结合支护结构变形控制限值选择合理高差。

(4)h型双排桩复合支护结构最大位移由后排桩主导,通过设计优化可减小后排桩位移,使复合结构变形分担更合理,在具备使用该支护结构的地段有一定的经济效益。

(5)实测支护结构位移较数值模拟结果偏大约10%,在成都膨胀土地区的工程实践中,建议采取支撑盲沟、仰斜式泄水孔等措施减小膨胀性土体的饱水程度,开挖桩间土期间减小前后排桩之间的扰动。

#### 参 考 文 献

- [1] 李朝阳,谢强,康景文,等.成都某膨胀土基坑边坡失稳机理分析[J].建筑科学,2015,31(9):8-12. (LI C Y, XIE Q, KANG J W, et al. Instability mechanism analysis of an expansive soil excavation slope in Chengdu[J]. Building Science, 2015, 31(9): 8-12. (in Chinese))
- [2] 邓安,彭涛.成都某膨胀土深基坑支护事故分析[J].四川地质学报,2015,35(1):126-131. (DENG A, PENG T. Analysis of an expansive soil foundation pit accident in Chengdu[J]. Acta Geologica Sichuan, 2015, 35(1): 126-131. (in Chinese))
- [3] SAWAGUCHI M. Lateral behavior of a double sheet pile wall structure[J]. Soils and Foundations, 1974, 14(1): 45-59.
- [4] 申永江,孙红月,尚岳全,等.锚索双排桩与刚架双排桩的对比研究[J].岩土力学,2011,32(6):1838-1842. (SHEN Y J, SUN H Y, SHANG Y Q, et al. Comparative study of anchor double-row piles and frame double-row piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1838-1842. (in Chinese))
- [5] 薛光桥.深基坑双排桩结构受力变形机理及其计算模型研究[J].铁道标准设计,2016,60(7):116-120. (XUE G Q. Research on mechanism and computation model of deep foundation pit double-row pile structure[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(7): 116-120. (in Chinese))
- [6] 岳大昌,李明,苏子将,等.成都某膨胀土基坑变形分析[J].施工技术,2013,42(9):41-44. (YUE D C, LI M, SU Z J, et al. Deformation analysis on some expansive soil foundation excavation in Chengdu[J]. Construction Technology, 2013, 42(9): 41-44. (in Chinese))
- [7] 袁贵兴,伍军康,毛家木,等.预应力承压型囊式扩体锚索在膨胀土地区基坑支护工程中的应用[J].四川建筑,2015,35(3):255-257. (YUAN G X, WU J K, MAO J M, et al. Application of prestressed pressure-bearing bladder expansion anchor cable in foundation pit support engineering in expansive soil area[J]. Sichuan Architecture, 2015, 35(3): 255-257. (in Chinese))
- [8] BRIAUD J L, POWERS III W F, WEATHERBY D E. Should grouted anchors have short tendon bond length?[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(2): 110-119.
- [9] 郑刚,聂东清,程雪松,等.基坑分级支护的模型试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(5):784-794. (ZHENG G, NIE D Q, CHENG X S, et al. Experimental study on multi-bench retaining foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 784-794. (in Chinese))
- [10] 丁海涛,杨保全.双排围护桩结构变形和受力三维非线性计算[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):517-526,558. (DING H T, YANG B Q. The 3-D nonlinear simulation analysis of the deformation and loading of double-row retaining piles structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 517-526,558. (in Chinese))
- [11] 阿比尔的,郑颖人,赖杰,等.牌坊坝滑坡双排桩+锚索支护性能研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1033-1038. (ERDI A, ZHENG Y R, LAI J, et al. Study on supporting properties of double-row piles with anchor in slide of Paifang Dam[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1033-1038. (in Chinese))
- [12] 许胜才,范秋雁,崔峰.基于ABAQUS的特殊双排桩支护结构三维有限元模拟[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1514-1521. (XU S C, FAN Q Y, CUI F. 3D finite element simulation for special type of double-row piles supporting structure relying on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1514-1521. (in Chinese))
- [13] 郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(1):1-36. (ZHENG G. Method and application of deformation control of excavations in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36. (in Chinese))
- [14] 张虎元,李秀祥.黄土基坑双排桩支护结构的有限元分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1102-1109. (ZHANG H Y, LI X X. The finite element analysis on the retaining structure for loess foundation pit with double-row piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1102-1109. (in Chinese))

- [15] 阎波, 胡科, 曹明. 桩间加固土参数对双排桩支护结构的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 226-232. (YAN B, HU K, CAO M. Analysis of the influences of reinforced soil parameters between piles on double row pile supporting structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 226-232. (in Chinese))
- [16] 马京京. H型双排桩-锚索复合支挡结构受力特征研究及结构优化 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021. (MA J J. Study on mechanical characteristics and structural optimization of H-shaped double row pile and anchor cable composite retaining structure[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021. (in Chinese))
- [17] 段瑞凯, 赵天雨, 杨果林, 等. 膨胀土高边坡双排桩板墙土压力试验研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51(20): 90-93,132. (DUAN R K, ZHAO T Y, YANG G L, et al. Experimental research on soil pressure of double-row pile-sheet wall on high slope with expansive soil[J]. Construction Technology, 2022, 51(20): 90-93,132. (in Chinese))
- [18] 徐邦栋. 高壑坡设计及病害分析与防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011: 373-376. (XU B D. High cutting slope design and disease analysis and prevention[M]. Beijing: China Railway Press, 2011, 373-376. (in Chinese))

收稿日期: 2023-10-23