

文章编号: 1005-0523(2023)03-0040-06



地下水位及开洞范围对地铁车站抗浮影响研究

代文超¹, 石钰锋^{1,2}, 陈昭阳¹, 胡绍伶¹, 方 焘¹, 陈小羊³, 占宇飞²

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西建筑设计院有限公司, 江西 南昌 330013; 3. 中建七局交通建设有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要:为加快整条线路的施工进度,拟在某即将建成的长大车站处增设轨排井,为保证铺轨施工,临时关闭了部分降水井,因此地下水位改变,从而引起既有车站的抗浮计算条件改变,可能对车站产生不利影响。基于现场监测数据,采用三维有限元软件,对地铁车站结构顶板增设轨排井及不同开洞范围所造成的主体结构上浮影响进行研究。研究表明:在不考虑车站主体结构与围护结构间摩擦阻力的情况下,封闭部分降水井后,设轨排井附近上浮量较大,并且车站不同部位所受上浮影响程度不同,在采取抗浮措施时应区别考虑。在同一水位条件下,车站顶板开洞范围与主体结构最大上浮量呈现非线性增长关系,因此针对不同开洞范围的轨排井、盾构井以及特殊设备井时,应采取不同措施防止车站主体结构上浮。

关键词: 地铁车站; 抗浮验算; 上浮量; 非线性增长

中图分类号: U452

文献标志码: A

本文引用格式: 代文超, 石钰锋, 陈昭阳, 等. 地下水位及开洞范围对地铁车站抗浮影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(3): 40-45.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230505.011

Study on the Influence of Groundwater Level and Opening Range on the Anti-Floating of Subway Station

Dai Wenchao¹, Shi Yufeng^{1,2}, Chen Zhaoyang¹, Hu Shaoling¹, Fang Tao¹, Chen Xiaoyang³, Zhan Yufei²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Architectural Design & Construction Institute Co., Ltd., East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China; 3. Communications Construction Company of CSCEC 7th Division Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China)

Abstract: In order to speed up the construction progress of the whole line, it is proposed to install additional track wells at a soon-to-be-completed grown-up station. To ensure the track-laying construction, some of the precipitation wells are temporarily closed, thus the groundwater level changes, thus causing a change in the calculation conditions of the floatation resistance of the existing station, which may have a negative impact on the station. The results show that, without considering the friction resistance between the main structure of the station and the enclosure structure, the amount of buoyancy near the railway track Wells is large after the closure of part of the precipitation Wells, and the influence degree of buoyancy is different in different parts of the station, so the anti-buoyancy measures should be considered separately. Under the condition of the same water level rise, the roof opening range and the maximum buoyancy of the main structure of the station show a nonlinear growth relationship. Therefore, different measures should be taken to suppress the buoyancy of the main structure of the station for the track wells, shield Wells and other special equipment wells with different opening ranges.

Key words: subway stations; anti-flotation calculation; floating volume; nonlinear growth

收稿日期: 2022-08-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42177162)

Citation format: DAI W C, SHI Y F, CHEN Z Y, et al. Study on the influence of groundwater level and opening range on the anti-floating of subway station[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 40-45.

相关学者利用不同手段对于地下结构抗浮结构设计、监测以及控制措施开展了大量研究。曹洪等^[1]对于临江二元地层,提出了一种更加合理实用的简化算法用于抗浮设计;张在明等^[2]利用现场测试等方法对场区内的地下水进行分析,对于工程抗浮问题,提出孔隙水压力的分布特征较于传统方法更具有可靠性;郑伟国^[3]提出可以将达到地下室入口地面标高的水位作为极限水位,以此对车站结构进行保守性抗浮分析;李广涛^[4]以实际工程为依托,采用数值模拟方法,最终确定了合理的抗浮设计方案,为地下空间结构的抗浮设计提供参考;马荣等^[5]认为围护结构与内衬墙通过冠梁连接成整体能够增加车站整体刚度,最大限度利用围护结构参与车站结构抗浮设计;陈昭阳等^[6]利用数值模拟及相关抗浮公式,对某超深基坑在高水位下进行抗浮验算,并提出围护结构底部所在地层的渗透系数对于围护结构上浮影响最大;牛斌等^[7]提出车站顶板及附属底板应设置在洪水最大冲刷线以下,不仅利于车站抗浮设计,更能减小行洪区对车站结构的不利影响;王露^[8]以实际工程为背景,通过现场测试、室内试验、数值手段与理论研究相结合的方法对于地铁车站底板处于特殊岩层中所受浮力及折减系数进行系统性研究;陈夏辉^[9]采用修正改进阻力系数法与有限元法确定地下结构抗浮水位值,以此设置合理的抗浮加固方案。

地下结构工程中常用的抗浮措施有配重、摩擦桩、锚固、扩底桩、降水、隔渗帷幕抗浮^[10-12]等。本文仅考虑地铁车站主体结构自重作用下抗浮效果。对某地铁车站在增设铺轨基地后依靠自重抗浮进行计算,采用理论及数值计算手段分析依托工程水位变化后的抗浮稳定性,以期抗浮措施决策提供依据,供类似工程提供借鉴。

1 工程概况

某车站整体长484.9 m,为13 m岛式站台,车站形式为地下两层两柱三跨矩形框架结构,采用明挖法施工;车站中部范围存在桥梁及河道,河道上穿结构顶板,宽约28 m,深约3 m,河道内常年有水,

平面分布如图1,2~9为主体结构断面编号。车站标准段宽21.8 m,顶板覆土约4.0 m。两端均接盾构区间,大小里程端均为双线盾构始发。

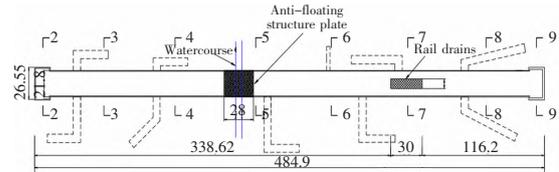


图 1 位置示意图(单位:m)
Fig.1 Position sketch map (Unit:m)

上覆地层主要为第四系人工填土、含有机质粉质黏土、粉质黏土,下伏基岩为全~微风化安山岩、强风化粉砂岩,详见图2。地下水类型主要为第四系潜水和基岩裂隙水,地下水径流深度较大,径流方向复杂。

原设计方案并未设置轨排井,为加快整条线路的施工进度,变更后设计方案为在其即将建成的长大车站处增设铺轨基地,尺寸为长37.8 m,宽16.1 m,该范围内不能进行覆土回填。为保障铺轨作业,封堵了部分降水井,为保证车站主体结构安全,需对地下水位上升时车站抗浮进行计算。

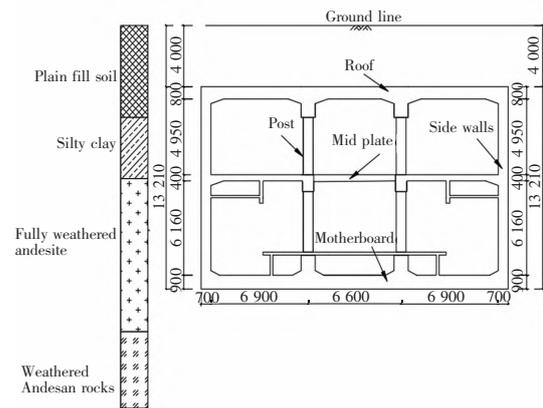


图 2 标准横断面图(单位:mm)
Fig.2 Standard cross section map (Unit:mm)

2 数值分析

2.1 模型建立

为计算考虑空间效应影响下地铁车站主体结构抗浮验算结果,采用Plaxis 3D软件建立三维有限元模型,对地铁车站主体结构原设计工况及变更后

工况(设置轨排井)分别进行验算,为消除模型边界效应,取模型尺寸为车站整体尺寸的3倍,即 X 方向为1500 m, Y 方向为200 m, Z 方向为80 m。数值模型中,约束模型底部、侧面、河道岸边土体、轨排井处及两端盾构区域土体法向位移,采用潜水位进行计算分析。

模型计算时,车站主体结构仅考虑梁、板、柱、河道处抗浮板、轨排井处混凝土挡墙和上覆土层的重量,忽略腋角、中板装修层、临时堆载、设备荷载等重量。梁、板、柱分别采用梁单元、板单元、桩单元模拟,围护结构采用位移边界模拟。

2.2 本构模型及参数选取

钢筋混凝土重度,弹性模量及泊松比分别取值为 25 kN/m^3 , $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$, 0.2 。不计主体结构侧面与地层之间的摩擦力,在接触面之间设置界面单元。

由于本模型仅计算车站主体结构在地下水中的抗浮能力,即仅考虑主体结构在地下水影响下的竖向位移及受力情况。且实际工程中,车站主体结构周围设置围护桩及旋喷桩,车站主体结构侧面与地层不接触。对地层进行简化处理,根据地勘报告相关设计资料,综合考虑多种因素,本次计算选取3.5 m作为设计水位,并设置不同深度土层的渗透系数。模型中的围护结构、车站梁-柱以及车站楼盖板结构采用线弹性本构,土体采用摩尔库伦本构。模拟所选参数见表1所示。

表1 土层参数
Tab.1 Soil layer parameters

Soil layer	Elastic modulus /MPa	Poisson's ratio	Permeability coefficient/(m/d)	Internal friction angle/($^{\circ}$)	Natural severity/(kN/m^3)	Thickness/m
Plain fill soil	15	0.35	8	15	20	6
Silty clay	20	0.3	0.3	14.3	20.1	4
Fully weathered andesite	490	0.3	0.3	35	21.5	10
Weathered andesite rocks	1 000	0.28	0.3	35	24	15

2.3 模拟过程及工况

根据现场施工情况将车站主体结构的关键过程进行分步模拟,根据实际施工的过程,通过设定网格的生死单元来模拟施工,具体模型施工计算过程如下:

- Step 1 对模型整体进行地应力平衡;
- Step 2 位移清零并施做围护结构;
- Step 3 基坑开挖并计算平衡;
- Step 4 位移清零并施做主体结构;
- Step 5 添加上覆土层并计算平衡;
- Step 6 进行位移清零;
- Step 7 按设计水位3.5 m设置水位。

为验算增设轨排井对车站主体结构抗浮产生的影响,于Step 4处分两种情况计算分析:①原设计方案计算分析;②变更后方案计算分析。

2.4 模拟结果分析

2.4.1 底板纵向弯矩分析

由于结构底板跨度较大,且内力变化差异主要集中在轨排井附近,为进一步详细分析底板结构内力变化差异,选取38~46轴号结构底板结构区域进行分析,如图3所示。未设置轨排井工况下,纵向底板主要承受负弯矩,弯矩值相对均匀分布,无明显突变区域;增设轨排井后,车站底板轨排井附近弯矩发生了较大突变,其中40轴号,41轴号和44轴号弯矩突变较为明显,最大弯矩值分别增加至534.8,610.5 $\text{kN}\cdot\text{m}$,较之前工况增加幅度分别为4.19倍和6.96倍,而在轨排井两侧区域出现最大负弯矩。总体上弯矩值较原设计工况明显增大,安全富余量显著降低,使得纵向底板可能会发生较大变形。

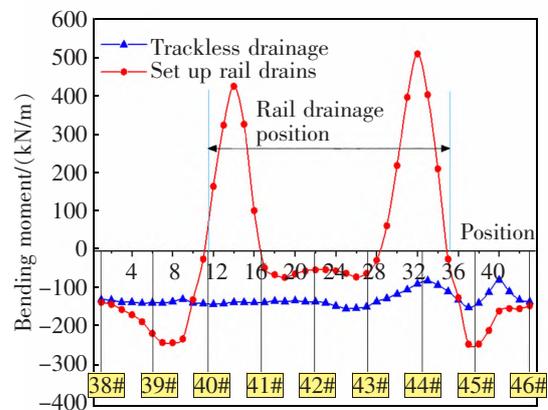


图3 原设计与变更后底板弯矩对比曲线图
Fig.3 Comparison curve of the bending moment of the original design and the changed baseplate

2.4.2 边墙纵向轴力分析

如图 4 所示原设计与变更后边墙纵向轴力对比曲线图,未设置轨排井工况下,边墙纵向轴力值整体分布较为均匀,整体呈现受拉状态;设置轨排井后,轴力值变化较大,变化范围整体呈现“弓”形,主要集中于 30~52 轴号之间。其中,在轨排井所在范围内轴力值大幅减小,在 43 轴号轴力值最小,最小值为-526.2 kN,较原设计工况减小幅度为 23.1%。在 30~40 轴号和 45~52 轴号之间,轴力逐渐增大。轴力最大值分别为-893,-912.8 kN,较原设计工况轴力最大值分别增加 9.1%、11.5%。纵向侧墙轨排井范围受拉力不均匀可能对结构产生不利影响。

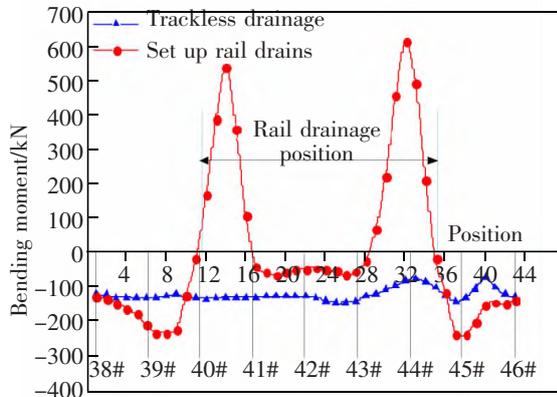


图 4 原设计与变更后边墙纵向轴力对比曲线图

Fig.4 Comparison curve of the longitudinal axial force of the original design and the wall after the change

2.4.3 底板上浮量分析

如图 5 所示,未设置轨排井工况,车站主体结构最大上浮量为 4.3 mm,在上覆土及自重作用下未超出预警值;在不采取任何抗浮措施情况下,增设

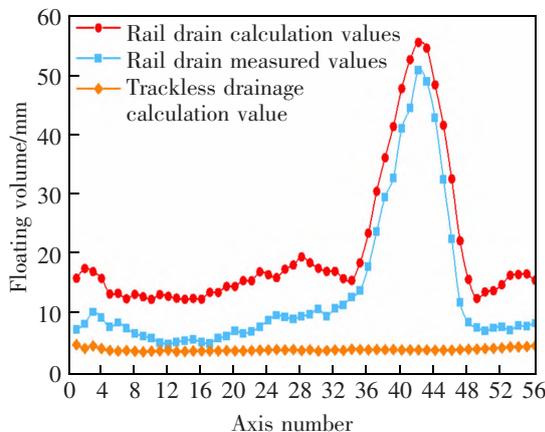


图 5 底板中线上浮量计算值与现场实测值

Fig.5 Calculated value of float on the midline of the baseplate and measured value on the site

轨排井后,相较于之前未设置轨排井工况,车站结构上浮变形量显著增加。其中对轨排井处主体结构上浮量影响最大,轨排井附近上浮量增长可近似看成线性关系,增长率约为 25%,所以增设轨排井后针对其各部分受到的上浮影响不同,在采取抗浮措施时应区别考虑进行抗浮设计参数优化。

2.4.4 三维数值结果与现场实测试验验证

为了验证本文模拟结果的可靠性,对变更后车站主体结构上浮量计算值与现场实测值进行对比,如图 5 所示。由图 5 可见,计算曲线与实测曲线变形趋势基本吻合,轨排井处主体结构最大上浮量基本相等,其中由于数值模拟中未考虑腋角、中板装修层、临时堆载、设备荷载等重量,故轨排井两侧车站底板中线上浮量值大于现场实测值。总体而言,模拟结果能够反映设置轨排井后车站主体结构的受力变形特性。

3 力学验算

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)相关规定,对于简单的浮力作用情况,基础抗浮稳定性应符合下式要求

$$\frac{G_k}{N_{w,k}} \geq K_w$$

式中: G_k 为建筑物自重及压重之和,kN; $N_{w,k}$ 为浮力作用值,kN; K_w 为抗浮稳定安全系数,结构设计应按最不利情况进行抗浮稳定性验算。不计地层侧摩阻力时抗浮安全系数不应小于 1.05;当抗浮安全系数计入地层侧摩阻力时,可采用 1.10~1.15。

根据既有图纸及参数按地下水水位标高为 3.5 m 时,选取主体结构断面 2-2、3-3、4-4、5-5、6-6、7-7、8-8、9-9 以及轨排井断面(图 1),按每延米进行原设计工况和变更后工况的抗浮验算。水位以下取浮密度为 1 t/m³,以上取天然密度为 2 t/m³;顶板、中板及底板尺寸均按图纸计算;结构自重包括车站主体结构自重、围护结构自重、压顶梁自重及顶板上覆土自重梁附加且均未计入隔墙、吊顶、轨顶风道等重量;各断面进行抗浮安全系数计算时,不计围护结构侧摩阻力。

由表 2 知,原设计工况中各断面抗浮安全系数均大于规范值 1.05,满足规范要求;变更后工况中,仅轨排井断面抗浮安全系数发生改变,其断面自重减小导致轨排井断面处的抗浮安全系数减小为

表2 各断面安全系数汇总表
Tab.2 Summary of safety factors for each section

Section	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	Rail drains
Safety coefficient (Original design)	1.112	1.158	1.170	1.156	1.217	1.224	1.077	1.140	-
Safety coefficient (Variations of the design)	1.112	1.158	1.170	1.156	1.217	-	1.077	1.140	0.710

0.710, 小于规范值 1.05, 印证上述三维有限元模型分析结果, 因此对于轨排井位置需有一定的抗浮措施, 以确保结构的安全可靠。

4 开洞尺寸影响抗浮分析

为探明该地铁车站开洞范围影响主体结构上浮量的安全范围, 选取受影响最大的结构底板下表面作为对象, 沿车站线路方向中心线及基底土体中心线进行有限元结果分析。拟选取 6 种工况(详见表 3), 研究结构厚板上开洞范围对主体结构上浮的影响。

如图 6 所示为不同开洞范围主体结构上浮曲线, 随着开洞范围逐渐增大, 车站主体结构上浮量及其上浮突变范围均在逐渐增大, 进而导致车站主

表3 工况表
Tab.3 Test cases

Working conditions	The longitudinal length of the opening/m	Lateral length of the opening/m
Working condition 1	30	8
Working condition 2	25	8
Working condition 3	20	8
Working condition 4	15	8
Working condition 5	10	8
Working condition 6	5	8

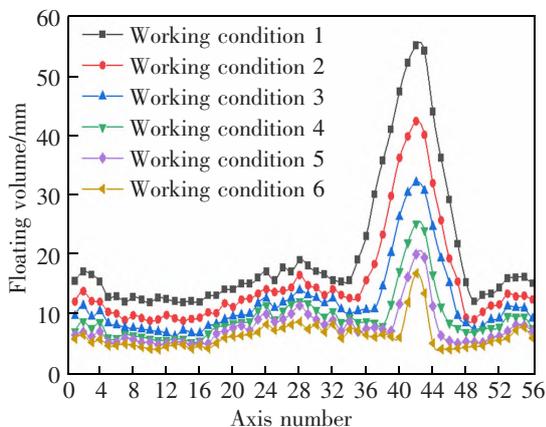


图6 不同开洞范围主体结构上浮曲线
Fig.6 Floating curve of the main structure of different opening ranges

体结构整体上浮量增大。仅考虑开洞尺寸大小的情况下, 车站主体结构上浮量有明显差异。上浮量由开洞位置向两边逐渐减小, 其中最大上浮量都出现在开洞位置中心处, 当纵向开洞长度 30 m 时, 最大值约为 56.29 mm, 当纵向开洞长度 5 m 时, 最大值约为 16.98 mm, 前者约为后者的 3 倍, 这说明不同开洞范围对车站主体结构最上浮量有较大的影响。

由图 7 不同开洞范围最大上浮量曲线可知, 开洞范围对车站主体结构上浮量影响较大, 纵向开洞长度 10 m 时, 最大上浮量较前一工况增加 3.61 mm 增加了 21.27%; 纵向开洞长度 15 m 时, 最大上浮量较前一工况增加 4.74 mm, 增加了 23.01%; 纵向开洞长度 20 m 时, 最大上浮量较前一工况增加 6.51 mm, 增加了 25.74%; 纵向开洞长度 25 m 时, 最大上浮量较前一工况增加 9.54 mm, 增加了 29.97%; 纵向开洞长度 30 m 时, 最大上浮量较前一工况增加 14.96 mm, 增加了 36.2%, 可以看出最大上浮量增长率随开洞范围的增大而逐渐加快。

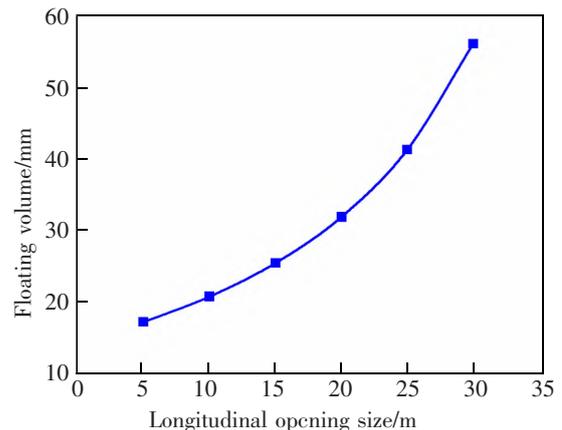


图7 不同开洞范围最大上浮量曲线
Fig.7 Maximum floating curve of different opening ranges

综上所述, 开洞范围对车站主体结构上浮量影响较大, 上浮量随开洞范围的增大而增大, 且最大上浮量与开洞范围呈现非线性增长关系, 不能通过

简单的累加计算的方式计算其上浮量。针对不同开洞范围的轨排井、盾构井以及其余特殊设备井时,应采取不同措施抑制车站主体结构上浮。

5 结论

1) 变更工况后,车站底板纵向及横向均满足抗弯承载力要求,但其局部纵向弯矩增大,安全富余量显著降低;对于边墙而言,受力较为复杂,总体上轴力增大明显,安全富余量也随之降低。

2) 原设计工况中,车站主体结构最大上浮量为4.3 mm,在上覆土及自重作用下未超出预警值;在不采取任何抗浮措施情况下,增设轨排井后,相较于之前未设置轨排井工况,车站结构上浮变形量显著增加。针对其各部分受到的上浮影响不同,在采取抗浮措施时可区别考虑以此进行抗浮设计。

3) 地铁车站厚板开洞范围对车站主体结构上浮量影响较大,最大上浮量与开洞范围呈现非线性增长关系。针对轨排井、盾构井以及特殊设备井等不同开洞范围时,应采取不同措施防止主体结构上浮。

参考文献:

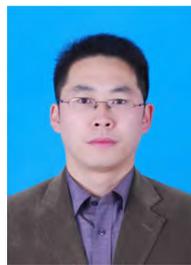
- [1] 曹洪,朱东风,骆冠勇,等. 临江地下结构抗浮计算方法研究[J]. 岩土力学,2017,38(10):2973-2979.
CAO H,ZHU D F,LUO G Y,et al. Study on anti-floating calculation method of underground structures near the river[J]. Geotechnical mechanics,2017,38(10):2973-2979.
- [2] 张在明,孙保卫,徐宏声. 地下水赋存状态与渗流特征对基础抗浮的影响[J]. 土木工程学报,2001(1):73-78.
ZHANG Z M,SUN B W,XU H S. The influence of groundwater occurrence state and seepage characteristics on foundation anti-floating[J]. China Civil Engineering Journal,2001(1):73-78.
- [3] 郑伟国. 地下结构抗浮设计的思路和建议[J]. 建筑结构,2013,43(5):88-91.
ZHENG W G. Ideas and suggestions for anti-floating design of underground structures[J]. Building structure,2013,43(5):88-91.
- [4] 李广涛. 广州地铁暹岗站的抗浮计算分析[J]. 隧道建设,2013,33(11):937-941.
Li G T. Analysis of anti-floating calculation of Siemgang station in Guangzhou metro[J]. Tunnel construction,2013,33(11):937-941.
- [5] 马荣,辛全明,张爱国. 地铁车站抗浮设计研究[J]. 交通世界,2021(26):28-30.
MA R,XIN Q M,ZHANG A G. Research on anti-floating design of subway station[J]. Transport World,2021(26):28-30.
- [6] 陈昭阳,李敏,高江林,等. 地下水水位及地层渗透系数对基坑抗浮影响研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):59-66.
CHEN Z Y,LI M,GAO J L,et al. The study on the influ-

ence of groundwater level and permeability coefficient on anti-floating of foundation pit[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(1):59-66.

- [7] 牛斌,王琦,郭婷. 行洪区地铁车站设计及安全措施研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(4):661-668.
NIU B,WANG Q,GUO T. Study on design and safety measures of subway station in honghang district[J]. Tunnel Construction(English and Chinese),2019,39(4):661-668.
- [8] 王露. 西北地区特殊红砂岩地层地铁车站抗浮研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
WANG L. Study on anti-floating of subway station in special red sandstone stratum in northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2019.
- [9] 陈夏辉. 坡地建筑地下结构浮力计算及抗浮措施研究[D]. 广州:广州大学,2020.
CHEN X H. Study on buoyancy calculation and anti-floating measures of underground structures in slope buildings[D]. Guangzhou:Guangzhou University,2020.
- [10] 王冬冬. 王家湾车站结构新抗浮施工技术[J]. 隧道建设,2015(S2):153-156.
WANG D D. New anti-floating construction technology of Wangjiawan station structure[J]. Tunnel construction,2015(S2):153-156.
- [11] 辛红芳. 地铁车站工程抗浮措施的技术经济比较[J]. 都市轨道交通,2008(3):67-69.
XIN H F. Technical and economic comparison of anti-floating measures for subway station engineering[J]. Urban express rail transit,2008(3):67-69.
- [12] 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2276-2284.
YANG G H. Development and new challenges of Guangdong deep foundation pit support engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(11):2276-2284.



第一作者:代文超(1997—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:1632159570@qq.com。



通信作者:石钰锋(1985—),男,教授,江西省“双千计划”首批培养类科技创新高端人才(青年),研究方向为隧道与地下工程。E-mail:270347713@qq.com。(责任编辑:姜红贵)