

文章编号: 1007-2993(2024)01-0070-05

上海紧邻地铁超大深基坑工程设计与实践

韩 晓

(上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

【摘要】 软土地区基坑工程施工难度大, 安全风险高。以上海核心区某临地铁站超深基坑工程为背景, 结合地铁轨道保护要求, 通过对临近地铁深基坑做针对性保护设计, 并加强基坑施工的过程控制, 在保证基坑工程顺利实施的同时有效地保护了地铁结构安全。工程实践表明, 设计中采用的一系列安全保护措施合理可靠, 可为同类深基坑工程提供参考。

【关键词】 地铁; 深基坑; 分坑技术; 支撑体系; 数值模拟

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.012

Design and Practice of Super-large Deep Foundation Pit Adjacent to Subway in Shanghai

Han Xiao

(Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

【Abstract】 The construction of foundation pit in soft soil area is very difficult and the risk is high. Based on the super deep foundation pit project in Shanghai core area, combined with the subway protection requirements, through targeted protection design for the deep foundation pit near the subway, and strengthening the process control of the foundation pit construction, the subway structure is well protected while ensuring the smooth implementation of the foundation pit project. Engineering practice shows that a series of safety protection measures adopted in the design are reasonable and reliable, which can provide reference for similar deep foundation pit projects.

【Key words】 subway; deep foundation pit; pits allocation; supporting system; numerical simulation

0 引言

近年来, 我国城市建设快速发展, 城市核心区中大型商业办公综合体项目通常地下开挖深度较大, 其中部分项目紧邻地铁等市政设施, 对周边环境的保护要求高。软土地区深基坑开挖易引起周边土体的扰动、邻近建(构)筑物变形开裂, 而地铁结构对变形的严格要求, 使得地下空间开发的难度成倍增加^[1-4], 岩土工程设计和施工难度较大。

段忠辉^[5]分析了深基坑开挖对下方既有地铁区间隧道的影响, 提出分期开挖、分层开挖和抽条开挖方式, 可有效控制地铁结构安全。陈仁朋等^[6]研究了深基坑开挖对于邻近地铁周围土压力变化的影响, 提出了设置分隔墙可减少地表沉降及围护墙水平位移。田雷等^[7]认为跳坑施工可有效降低对既有地铁的影响, 变形控制效果显著。目前, 关于深基坑开挖对邻近地铁结构产生的影响已有一定的研究成果, 但是

针对如何开展紧邻地铁的深大基坑设计施工, 使地铁结构的变形控制在保护要求范围内, 仍缺少一套较完整的设计施工方法。

以上海某紧邻地铁深基坑工程为例, 阐述了软土地区深基坑开挖对地铁的影响, 详细介绍了基坑设计采取的主要保护措施, 包括基坑分坑分时设计、与相邻在建基坑交叉施工工况统筹管理、三轴搅拌桩加固设计、支撑轴力伺服系统应用以及先远后近的盆式开挖等, 基坑监测与工程实施效果均验证了该套设计方法的有效性, 可为软土地区紧邻地铁超大深基坑工程设计提供借鉴与参考。

1 工程实例

1.1 项目概况

本项目基坑面积约为 15227 m², 另包含地铁出入口 786 m², 基坑形状为矩形。根据周边道路标高, 确定基坑开挖深度为 16.60 ~ 17.02 m, 出入口开挖深

度为 8.65 m。基坑周边为市政道路(见图 1),其中西侧现状道路下为地铁车站,基坑西侧边线距离现状道路边线约 10 m,距离地铁车站约 14.8 m。基坑东侧距离现状道路约 3.0 m。基坑南侧距离规划道路边线约 3.0 m,另该规划路南侧为在建地下两层项目,距离本基坑约 23 m,南侧项目后期地下室施工可能与本工程基坑存在交叉施工影响。基坑北侧距离现状道路约 3.0 m。基坑西侧和北侧现状道路下方分布有数量众多的给水管、煤气管、雨污水管等地下管线,其中,西侧 $\phi 300$ 煤气管与基坑最小净距 17.7 m,北侧 $\phi 300$ 燃气管与基坑最小净距 7.2 m;东侧道路下方分布有雨污水地下管线;南侧规划道路暂无重要管线分布。

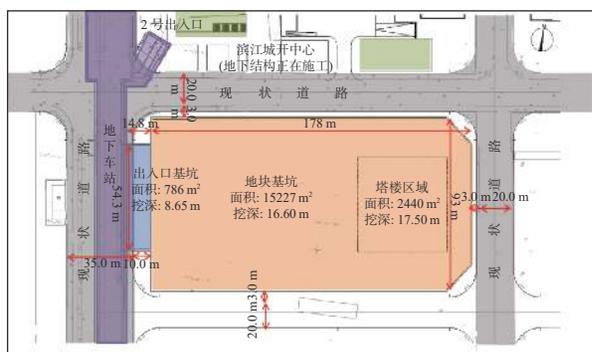


图 1 基坑周边环境图

拟建基坑西侧地铁车站为地下两层侧式站台车站,主体采用双柱三跨钢筋混凝土箱形结构。车站标准段基坑深约为 15.685 m(站台中心处),南北端头井基坑深约为 17.385 m。车站围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙,地连墙深度为 28.4 m。根据《上海市轨道交通保护区暂行管理规定》,拟建基坑位于轨道交通保护区范围内,地下车站与隧道为本工程重点保护对象。根据该暂行管理规定,本项目深基坑、桩基、降水及结构施工等各种卸载和加载的建筑活动对地铁工程设施的综合影响限度必须符合以下标准:①地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量 ≤ 10 mm(包括各种加载和卸载的最终位移量);②隧道变形曲线的曲率半径 $R \geq 15000$ m,相对弯曲 $\leq 1/2500$;③由于建筑物垂直荷载(包括基础地下室)及降水、注浆等施工因素而引起的地铁隧道外壁附加荷载 ≤ 25 kPa;④由于打桩振动、爆炸产生的震动对隧道引起的峰值速度 ≤ 2.5 cm/s。

综上,本工程基坑周边环境相对紧张,尤其西侧紧邻地铁车站,保护要求较高,基坑设计和施工需重点关注,并采取针对性措施。

1.2 工程地质概况

拟建场地为滨海平原地貌类型,地势平坦。地

基土主要由饱和黏性土、粉性土和砂土组成。场地受古河道切割,⑥层暗绿色粉质黏土缺失,代之为沉积厚度较大的⑤₃、⑤_{3i}层。勘察揭示,场地⑦₂层层面起伏较大,⑨₁层层面稍有起伏。

场地地下水分为浅层孔隙潜水和承压水。④₂、⑤_{3i}、⑤_{3.2}层为微承压水含水层,⑦₂和⑨层为承压含水层。勘察期间测得④₂层微承压水水位埋深为 2.85~3.00 m。⑤_{3i}层微承压水水位埋深为 4.12~4.21 m。

场地土层主要物理力学参数见表 1。

表 1 土层主要物理力学性质参数表

层号	土层名称	重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	ϕ ($^{\circ}$)	c (kPa)	渗透系数 k ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
②	粉质黏土	18.6	20.0	20	2.0×10^{-6}
③	淤泥质粉质黏土	17.5	14.0	12	1.0×10^{-5}
③ _i	粉质黏土夹淤泥质粉质黏土	18.5	24.0	5	2.0×10^{-4}
④ ₁	淤泥质黏土	16.7	11.5	12	2.0×10^{-7}
④ _{2.1}	黏质粉土夹粉质黏土	18.3	18	12	1.0×10^{-4}
④ _{2.2}	砂质粉土	18.5	26	5	5.0×10^{-4}
⑤ ₁	粉质黏土	17.9	18.0	15	2.0×10^{-6}
⑤ _{3.1}	粉质黏土	18.1	20	17	5.0×10^{-6}
⑤ _{3i}	粉质黏土与砂质粉土互层	18.4	24	12	3.0×10^{-4}

2 基坑设计

2.1 基坑支护形式

本工程属于超大规模地下空间开发,紧邻地铁车站,基坑周边环境保护要求高,地质条件较差,根据上海市地方标准《基坑工程微变形控制技术标准》(DG/T J08—2364—2021),确定本工程基坑安全等级为特级,临近地铁侧基坑环境保护等级为一级,其余侧为二级。综合考虑基坑场地条件和周边环境等因素,并结合基坑自身特点,支护设计采用刚度大、安全性高的地下连续墙作为围护结构,以保证基坑变形受控。考虑到场地④₂、⑤_{3i}、⑤_{3.2}层为微承压水含水层,故地连墙设计长度需隔断微承压含水层,切断承压含水层的水平补给,减小坑外土体沉降变形。具体基坑设计采用地下连续墙+3道钢筋混凝土支撑的形式,基坑典型支护剖面见图 2。

2.2 基坑分区、分时设计及效果

(1) 分区、分时设计

为减小基坑开挖施工对西侧地铁车站的不利影响,根据“时空效应”原理^[8],对基坑采用分区、分时施工,即根据轨道交通保护相关要求,将整个基坑由东向西分为 A—D 五个区块(见图 3)。远地铁侧 A、

B两区块基坑总面积将近 10380 m², 结合本项目的施工进度要求, 为了确保东侧的超高层塔楼施工进度, 同时考虑控制基坑变形, 减少单次基坑开挖量, 降低施工风险, 于 A、B 两区块间沿地铁纵向增设封堵墙, 将其分为两个基坑。考虑到地铁目前为运营线, 兼顾保护地铁设施和实施工期的要求, 邻地铁侧区块单独划出约 20 m 宽窄条基坑 C, 并进一步将 C 坑分为 C1 和 C2 两个小基坑, 以控制该两个临轨基坑面积不大于 1000 m²。整个项目基坑施工顺序为 A→B→C1→C2→D, 并要求当前基坑地下结构施工至±0.00 后, 方可开挖下一工况基坑, 以避免一次性大面积开挖引起的太大坑内土体回弹和隆起, 进而对西侧地铁车站产生不利影响。

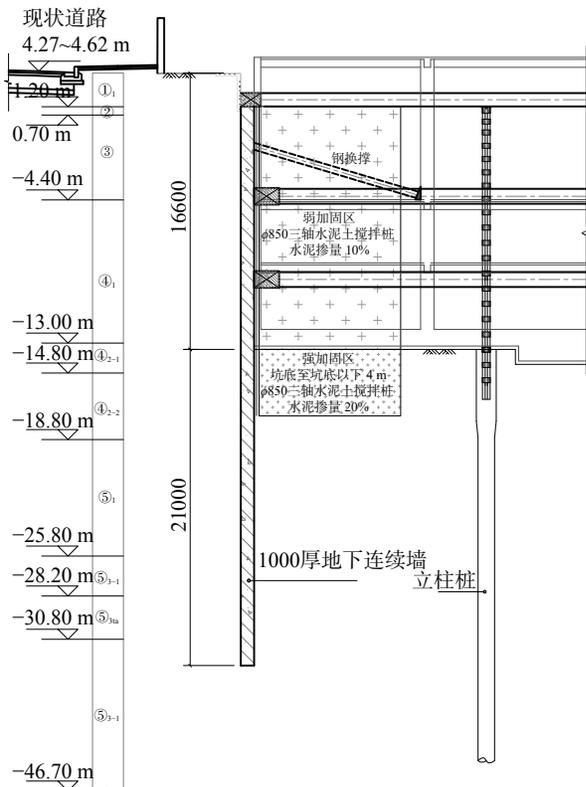


图2 基坑典型支护剖面(单位:mm)

本工程基坑边线距离三侧道路边线均为 3 m 左右, 西侧又紧邻地铁车站, 整个场区施工空间狭小, 采取分区施工, 既满足了施工空间要求, 又减小了施工对周边环境的影响, 一定程度上也缩短了支撑与土方开挖施工的绝对工期。

(2) 分区、分时效果

由于 A 坑距离地铁车站相对较远, A 坑支撑布置采用角、对撑结合边桁架的布置形式, 并设置栈桥, 以保证施工堆场及土方开挖的顺利实施。B 坑距离地铁车站相对较近, 采用刚度更大的十字对撑的布置形式, 以保证基坑变形可控。

通过对 A、B 区不分区和分区工况下的围护结构内力进行计算, 验证远离地铁侧基坑分区的合理性, 具体围护结构内力计算见表 2 和表 3。

根据计算结果对比, 远离地铁侧 A、B 区的合理划分更有利于控制基坑变形, 既优化了围护结构的受力, 也避免了超长混凝土支撑的不利收缩变形。

2.3 相邻基坑交叉工况设计

由于南侧项目基坑与本项目基坑存在交叉施工情况, 两超大地下空间交叉开发施工, 其地下土体受力机理及支护系统之间相互影响十分复杂。为了确保两个基坑的安全, 设计时应保证相邻基坑的安全距离, 加强相邻侧支护结构; 相邻基坑的支撑体系在竖向布置上基本一致, 以确保两侧支撑水平力的一致性; 加强相邻侧的各自支撑体系, 本项目以正交支撑为主, 以提升支撑体系的水平刚度。

施工时应避免相邻基坑同时开挖的工况, 即: 本项目 A 区基坑开挖与南侧项目 1 区基坑开挖可以同时施工; 本项目 A 区基坑开挖与南侧项目 2 区基坑开挖要错开施工, 挖深高差尽量控制在层高度以内, 本项目 A 区 B2 层顶板施工完成, 南侧项目 2 区基坑方可开始开挖; 南侧项目 2 区基坑底板施工完成, 本项目 B 区基坑方可开始开挖。顶板、底板的浇筑亦有利于两个基坑的变形控制。

两项目在施工过程中需加强统筹管理, 密切沟通、协调, 紧密合作, 并加强监测数据信息互通, 对施工质量和安全管理把控从严, 确保双方基坑安全。

2.4 临地铁站基坑设计

为减小地下连续墙施工对地铁车站的影响^[9], 于 C 区基坑地连墙内外两侧槽壁采用水泥搅拌桩加固, 兼做止水帷幕。考虑本工程基坑开挖范围内的地层大部分为流塑状态的淤泥质粉质黏土或淤泥质土, 为提高基坑被动区土体抗力, 控制基坑开挖过程中及开挖以后围护桩的变形, C 区基坑西侧边采用三轴水泥土搅拌桩裙边加固。C 区基坑内部设置 6 m 间距抽条加固, 加固深度为坑底以下 4 m。坑底以上采用弱加固的形式。D 区采用三轴水泥土搅拌桩按 3 m 间距进行抽条加固, 加固宽度为 14.8 m, 加固范围为坑底以下 5 m 至坑底以上 3.15 m, 两道支撑之间采用弱加固形式。

C 区沿竖向设置 1 道混凝土支撑+3 道 φ800×20 mm 钢支撑+水平换撑(φ609×16 mm)。其中钢支撑采用伺服系统, 支撑轴力伺服系统 24 小时工作, 并及时根据基坑监测数据, 自动调整钢支撑轴力, 将基坑变形严格控制在设计报警值之内, 减少对地铁、管线以及道路的影响。

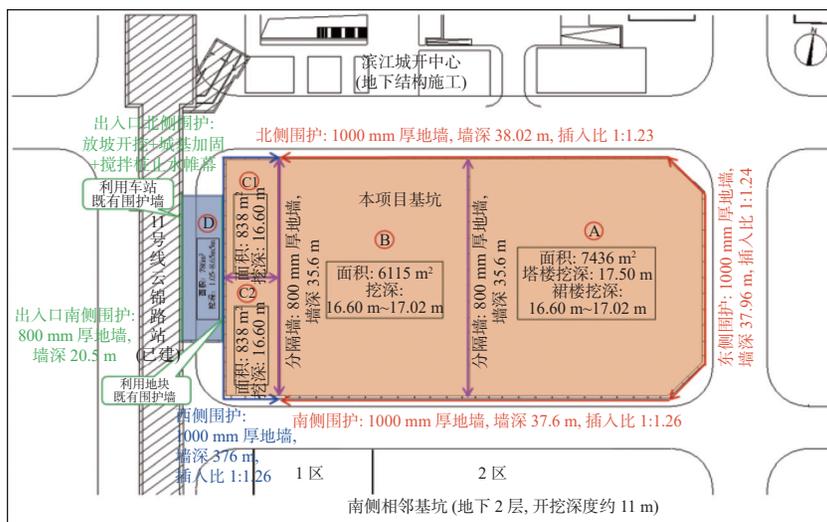


图3 基坑分坑平面图

表2 A区和B区分区时围护结构内力计算结果

不分区工况	最大弯矩 / (kN·m)	最大轴力 / kN	最大剪力 / kN	最大位移 / mm
第一道撑	2617	7081	1573	12.7
第二道撑	6878	22125	4555	28.5
第三道撑	6091	16230	3464	19.3

表3 A区和B区分区时围护结构内力计算结果

分区工况	最大弯矩 / (kN·m)	最大轴力 / kN	最大剪力 / kN	最大位移 / mm
第一道撑	2526	6557	1815	10.6
A区 第二道撑	6185	16370	4216	16.7
A区 第三道撑	5554	14701	3786	15.0
第一道撑	3368	3540	2103	11.0
B区 第二道撑	8640	7953	5074	21.5
B区 第三道撑	7850	7924	4610	17.5

另外,为更有效地控制基坑变形,于C区坑底设置 300 mm 厚 C30 素混凝土垫层,垫层内设置 H300×300×10×20 mm 型钢支撑,每幅墙两根,每根型钢支撑预加轴力 300 kN。临地铁侧基坑支护剖面见图 4。

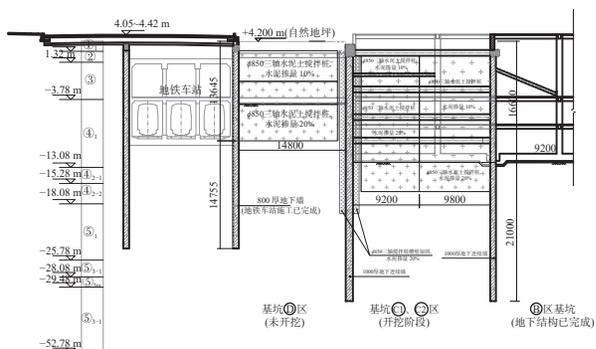


图4 邻地铁侧基坑支护剖面(单位:mm)

2.5 土方开挖

根据基坑的形状、挖深和周边环境要求,按照距离地铁“先远后近”分区开挖支撑施工,各区按照“分层、分区、尽早形成支撑或底板、留土护壁、盆式开挖”原则^[10]指导开挖,明挖顺作法施工。按设计场地移交次序(A区→B区→C1区→C2区→D区)由东至西退挖施工。根据支撑布置形式,A、B区基坑分块从中心向四周开挖,C、D区分块间隔开挖。基坑A、B区竖向分4层开挖,C1、C2区竖向分5层开挖,第1层为大开挖,第2—5层土为分块盆式开挖。临地铁侧基坑沿地铁侧留土宽度不少于4倍的单层挖深,且最后挖除,单块土体的开挖支撑总施工时间控制在24 h以内,以控制围护结构的位移和坑底回弹,在挖土完成7~10 d内完成全部底板施工。

3 围护结构监测数据对比

根据轨道相关部门要求,基坑施工前,需要对临轨基坑开挖对轨道产生的影响进行安全性评估和预测。根据有限元分析理论^[11-12],对各施工工况下基坑及西侧地铁车站的变形进行了模拟分析(见图5、图6)。

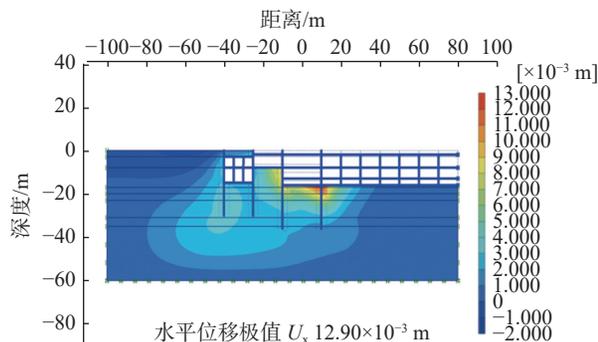


图5 基坑变形模拟分析

根据理论计算结果,基坑开挖各工况,支护结构最大变形满足基坑安全和环境保护要求。根据有限

元数值模拟分析结果,基坑开挖引起的地铁结构最大水平位移为 2.42 mm,最大竖向隆起为 5.16 mm,均满足地铁结构的安全保护要求。

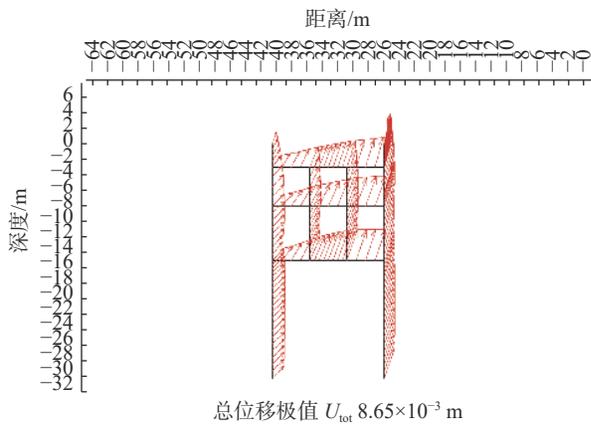


图6 地铁车站变形模拟分析

根据 2022 年 11 月 22 日(D 区地下结构完成)地铁监测数据(见图 7、图 8),地铁车站道床结构水平位移最大值为 1.79 mm,最大沉降 4.37 mm,均满足地铁结构的安全保护要求,表明针对地铁车站所采取的保护措施取得了很好的效果。

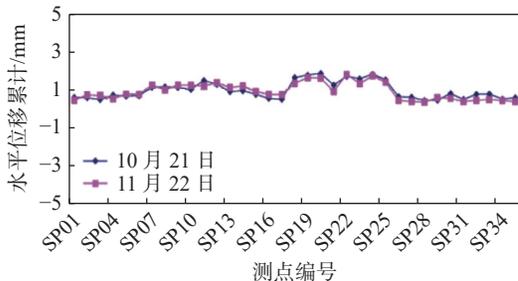


图7 道床水平位移累计曲线图

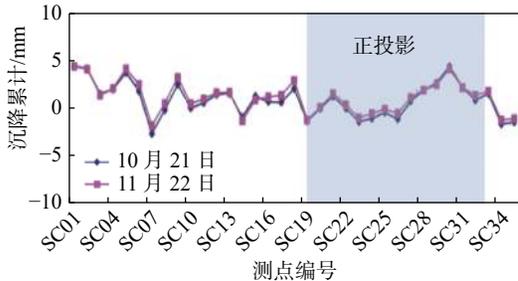


图8 道床沉降累计曲线图

4 结论

(1)针对赋存多层地下水的软土深基坑,选择超深地下连续墙+内支撑支护,有效切断了坑内外水力联系,对控制基坑变形、保护周边环境是有效的。

(2)针对紧邻地铁,为避免因基坑大面积开挖卸荷引发地铁轨道上浮、基坑过大侧向变形导致地铁

轨道产生过大侧向变形,遵照基坑时空效应原理,基坑设计采取分区、分时施工,有效地降低了基坑施工对邻近地铁的不利影响。

(3)对近地铁侧分区基坑,采用水泥土搅拌桩对连续墙槽壁及坑内被动区进行加固,对控制基坑和地铁变形起到了积极的作用。

(4)根据监测数据显示,基坑开挖引起的地铁车站道床结构水平位移最大值为 1.79 mm,最大沉降 4.37 mm,满足地铁结构的安全保护要求,验证了基坑设计方法和保护措施的有效性。

参考文献

- [1] 沈雯,沈蓉,孙廉威.超深基坑分区开挖对侧方地铁影响的实测分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(S1):354-360.
- [2] 程玉兰,王毅红.软土深基坑与邻近地铁车站相互变形影响分析[J].城市轨道交通研究,2019,22(9):14-20.
- [3] 王利军,邱俊筠,何忠明,等.超大深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):77-85.
- [4] 陈卫林,刘兴旺,陈东,等.复杂地层条件下邻近地铁超深基坑关键技术[J].四川建筑科学研究,2020,46(S1):41-47.
- [5] 段忠辉.既有地铁区间隧道上方深大基坑开挖安全影响分析[J].建筑结构,2020,50(S2):747-752.
- [6] 陈仁朋,AL-MADHAGI ASHRAF,孟凡衍.基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):6-11.
- [7] 田雷,黄高亮,张芳川.地下工程施工对既有地铁隧道的变形控制研究[J].城市建设理论研究,2022,(32):133-136.
- [8] 刘国斌,王卫东.基坑工程手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [9] 杜志云,冯庆元.复杂地质条件下超深地下连续墙槽壁稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):856-863.
- [10] 贾坚.软土时空效应原理在基坑工程中的应用[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):490-493.
- [11] 奚家米,熊元林,张驰,等.复杂环境下软土深基坑开挖对周围环境的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2021,42(1):68-75.
- [12] 李勇,李明,马鹏杰,等.地铁深基坑围护结构安全监测与数值模拟分析[J].南华大学学报(自然科学版),2018,32(6):28-36.

收稿日期:2022-08-22