

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.05.010

文章编号:1672-3767(2021)05-0087-11

基于空间效应的土岩二元地层深基坑变形规律研究

宫志群^{1,3}, 丁北斗², 李 阳^{1,3}, 马占国², 秦天琦², 杨继辉⁴

(1. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100029; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 中建华东投资有限公司, 江苏 徐州 221005; 4. 中建市政工程有限公司, 北京 100071)

摘要:为了研究土岩二元地层深基坑的变形规律,以徐州市地铁3号线南三环站深基坑工程为研究对象,监测不同施工阶段基坑围护桩侧移、基坑周边地表沉降和内支护轴力。同时,采用数值模拟方法进一步探究不同刚度放大系数和施工顺序下基坑空间效应的差异性。结果表明:土岩二元地层基坑有明显的空间效应,基坑围护桩变形和周边地表沉降要远小于土质基坑,围护桩最大侧移所处位置的平均值为0.439 45倍的开挖深度;随着刚度放大系数的减小,围护桩弯矩增大,基坑长边与短边展现出更加明显的空间效应,而阴角与阳角处的空间效应变化不显著;施工顺序对基坑空间效应有影响,分层施工的空间效应较分区分层施工更加显著。

关键词:地铁车站;土岩二元地层;深基坑;空间效应;变形规律;数值模拟

中图分类号:TU43

文献标志码:A

Study on deformation laws of deep foundation pits in soil-rock dualistic strata based on space effect

GONG Zhiquan^{1,3}, DING Beidou², LI Yang^{1,3}, MA Zhanguo², QIN Tianqi², YANG Jihui⁴

(1. China Construction Infrastructure Co. Ltd, Beijing 100029, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. China Construction East China Investment Co. Ltd, Xuzhou, Jiangsu 221005, China;

4. China Construction Municipal Engineering Co. Ltd, Beijing 100071, China)

Abstract: In order to study the deformation laws of deep foundation pits in soil-rock dualistic strata, the study monitored the horizontal displacement of enclosure piles, the surface settlement around the foundation pit and the axial forces of inner supports under different construction stages by taking the deep foundation pit construction of South Third Ring Subway Station of Xuzhou Metro Line 3 as an example. Meanwhile, further research was conducted to analyze the difference of space effect of foundation pits under different stiffness magnification factors and construction sequences by means of numerical simulation. The results show that foundation pits in soil-rock dualistic strata have manifest space effect. Their deformation of enclosure piles and surface settlement are far lower than those of soil foundation pits. The average position of maximum displacement of enclosure piles is 0.439 45 times of excavation depth. With the decrease of stiffness magnification factors, the bending moment of piles increases. The long and short sides of the foundation pit exhibits more obvious space effect, but the inner and external corners have less obvious space effect. Construction sequences have an impact on the space effect of foundation pits, which is more obvious under layered construction than that under partition and layered construction.

Key words: subway station; soil-rock dualistic strata; deep foundation pit; space effect; deformation law; numerical simulation

收稿日期:2021-05-19

基金项目:中建基础科技研发计划资助项目(CSCIC-2020-KT-(03));徐州市科技局社会发展项目(KC19216)

作者简介:宫志群(1970—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授级高工,硕士,主要从事基础设施施工技术及管理研究。

丁北斗(1973—),男,安徽安庆人,副教授,博士,主要从事空间结构健康监测及安全性研究,本文通信作者,山东科技大学城镇建设专业1993级校友.E-mail:dbdstar@163.com

随着基础设施建设和城市地下空间发展的需要,越来越多的城市开始建设地铁公共交通。截至2020年上半年,我国内地累计有41个城市投运地铁线路,总里程达6 917 km。新建地铁车站多处于城市中心地带,受原有建筑、地下管廊等条件的限制,地铁车站往往存在狭长、异形等特点。由于基坑场地的复杂性,基坑工程施工往往会对周围环境产生不良影响,如2008年杭州地铁湘湖站基坑地连墙发生失稳导致周边地表塌陷,造成17人死亡^[1]。为防止类似事故发生,开展地铁车站深基坑变形规律的研究十分必要。

基坑稳定性与开挖顺序、分区方式、时间等因素存在一定的联系^[2],为基坑工程基于时空效应的理论研究提供了重要的启示。基坑的时空效应在软土基坑^[3]、红黏土基坑^[4]等土质基坑中得以验证,但针对土岩二元地层基坑时空效应的研究相对较少。杜磊等^[5]基于施工空间效应,采用数值分析方法研究土岩二元地层基坑和下卧隧道的相互影响。商大勇^[6]建立了基坑坑角局部模型,分析土岩二元地层基坑的坑角效应以及支护结构对阳角变形的影响。

然而上述研究中的监测结果与数值模拟的相互验证并不完善,并且未考虑基坑工程具有较强的区域性特点。因此,本研究以徐州地铁3号线南三环车站深基坑工程为研究对象,基于空间效应,针对该地区特殊的土岩二元地层进行监测和模拟研究,以探究:基坑在车辆静载、地下水压力等多种荷载作用下的变形规律及土岩二元地层基坑的空间效应特性;土层和岩层的刚度差异以及施工顺序对土岩二元地层基坑空间效应的影响。

1 工程概况

1.1 车站概况和场地条件

徐州地铁3号线南三环车站位于三环南路和北京路交叉口,沿南北方向布置,为地铁1号线和4号线的换乘车站(4号线尚未开工)。车站标准段为地下3层岛式车站,局部区域可达地下4层,以作为4号线的换乘节点。地铁车站东西两侧基坑总长均为219.5 m,北侧宽度为27.9 m,南侧宽度为26.8 m,标准段开挖深度为20.52~26.92 m,局部四层区域最大开挖深度可达32 m。

基坑场地与水平面呈 1.72° 的夹角。场地共分为5层:第1层是厚度为1.70 m的杂填土,第2层是厚度为2.82 m的黏土,第3层是厚度为0.3~23.3 m的中风化泥灰岩,第4层是厚度为41.3 m的中风化灰岩,之下均为中风化闪长斑岩。场地以中风化灰岩为主,其承载力较好,压缩性低,但沿东西向斜层产状角度达 70° ,呈自西向东滑动的趋势,西侧自稳性较差。岩石裂隙水较发育,地面以下20 m为地下水层,通过设置排水沟和集水坑降低水位。

1.2 围护结构布置方案和施工工况划分

围护结构采用围护桩+内支撑+锚索的方式布置。基坑共有两道混凝土支撑,竖向间距为8.5 m,见图1。基坑中部布置有12根立柱桩兼做抗拔桩,立柱桩用连系梁连接以加强整体性。第2道支撑之下8.5 m,在基坑西侧设1道预应力锚索,并以此为基础向下5 m,在局部4层区域再设1道预应力锚索。锚索采用采用一桩一锚的方式布置,预应力为900 kN。基坑采用明挖法,为保证路面交通畅通,第1道支撑上安装预制盖板和军用行道梁。

工程采用分区分层施工方法,根据实际施工进度安排,基坑可分为A、B、C 3个施工区域,施工过程可分为6个施工工况,见表1和图2。

2 监测数据分析基坑的空间效应

2.1 监测方案和测点布置

本项目地处闹市区,为了监测基坑开挖对基坑和其周边环境的影响,用外径为70 mm的测斜管测量围护桩的水平位移,用精密水准仪测量基坑周边地表的沉降,用GXR振弦式钢筋计监测内支撑实际轴力和监测轴力的差异。测点位置见图3。围护桩水平位移监测点共25个,每个间隔10~15 m,命名为ZQT-X。地表沉降监测点共26组,命名为DBC-X。每组分为3个测点,组内测点距基坑边界的距离分别为2、10和18 m,根据测点到基坑边界的距离,由近及远依次命名为DBC-X-1、DBC-X-2、DBC-X-3。内支撑轴力测点共12个,命名为ZCL-X。X均代表测点序号。以上所有测点数据记录频率为7天1次,其中不包含工况6。

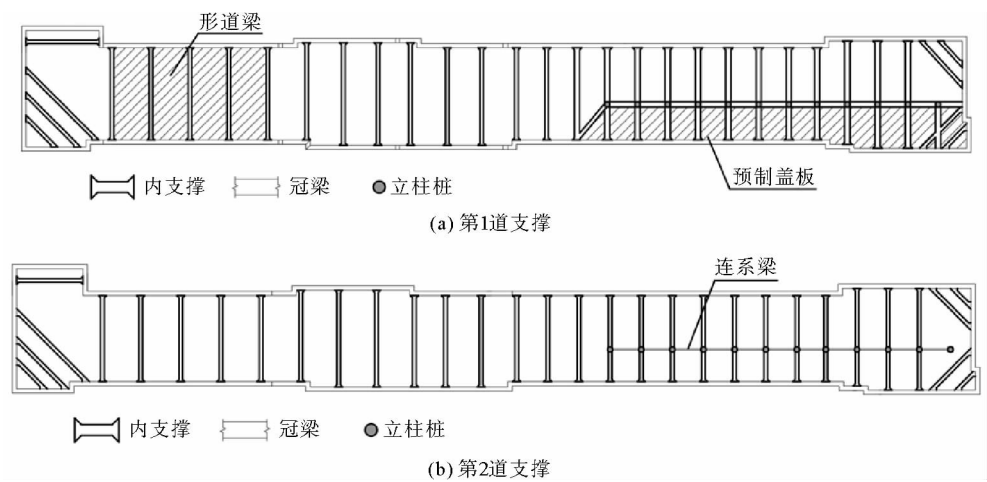


图 1 基坑内支撑布置方案

Fig. 1 Layout scheme of support in foundation pit

表 1 施工工况划分

Tab. 1 Division of construction conditions

工况	工作内容
1	A 区和 C 区围护桩施工
2	C 区开挖至 1 层,并安装相应支撑
3	B 区围护桩施工,B 区开挖至 1 层,C 区开挖至 2 层,并安装相应支撑
4	A 区开挖至 1 层,B 区开挖至 2 层,C 区开挖至 3 层,并安装相应支撑
5	三个区域全部开挖至基坑底部
6	开挖至局部基底

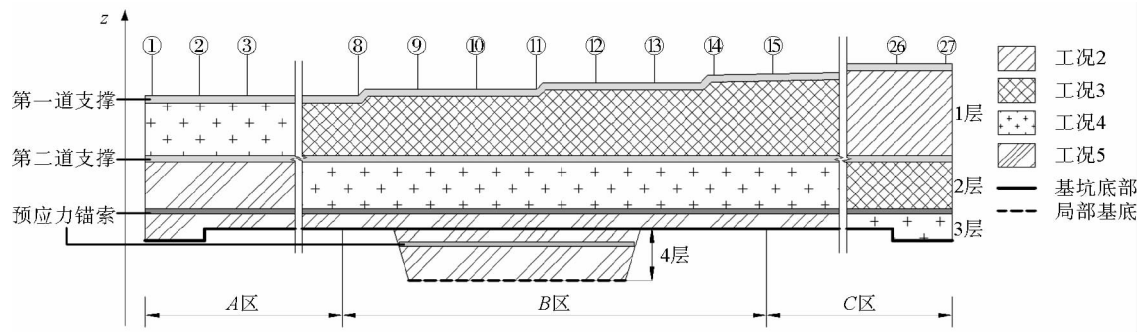


图 2 基坑区块划分

Fig. 2 Block division of foundation pit

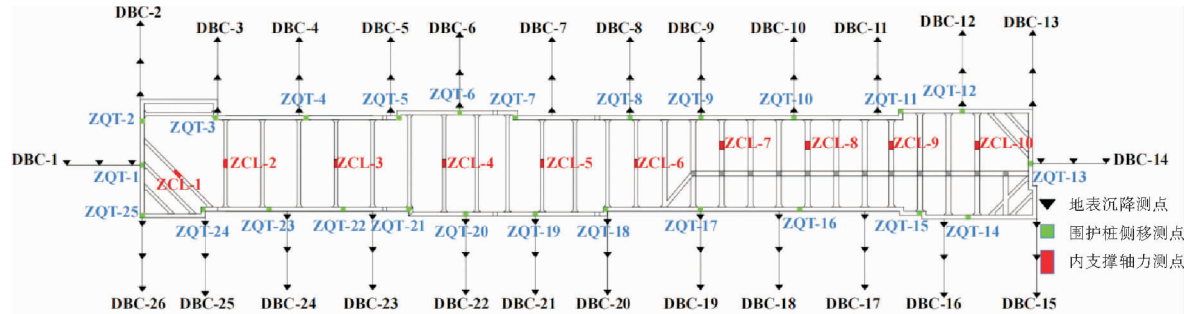


图 3 监测测点布置图

Fig. 3 Layout of monitoring points

2.2 数据分析

2.2.1 深基坑围护结构变形的空间效应

为实现开挖全过程分析,选取基坑东侧长边测点 ZQT-10 和基坑南侧短边测点 ZQT-13,将二者水平位移随时间的变化规律整理于图 4。由图 4 可知,随着时间推移,围护桩的水平位移呈增大的趋势。开挖前,围护桩呈现出类似悬臂构件的变形特点;开挖后,随着基坑内侧土压力减小,围护桩呈现出“凸胀”式的变形特点,桩顶产生较小的水平位移,且最大侧移出现位置随着开挖深度的增加而下移。

一般而言,受空间效应的影响,基坑长边的水平位移大于短边,故将基坑长边跨中区域作为设计验算的危险截面。本项目中,虽施工完成后的结果表明 ZQT-10 的水平位移大于 ZQT-13,但在施工进行到工况 2 和工况 4 时,基坑短边的水平位移与长边相近,甚至超过长边,这可能是因为 ZQT-10 受附近预制盖板偏心作用的影响,但也说明外荷载的作用会对基坑空间效应产生影响。穿过土层后,单位深度内围护桩的水平位移量减小,说明岩层限制了围护桩的变形。

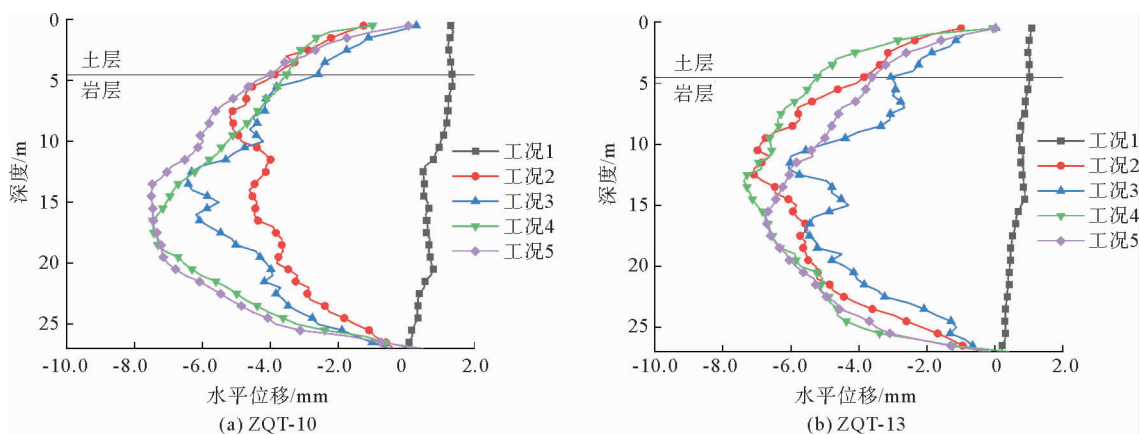


图 4 开挖过程围护桩测点水平位移对比

Fig. 4 Comparison of horizontal displacement of measuring points installed on enclosure piles

为进一步探究土岩二元地层围护结构的水平位移和开挖深度之间的关系,将测点 ZQT-1~ZQT-25 开挖全过程的最大水平位移绘制于图 5。由图 5 可知,位于基坑北侧短边的测点 ZQT-1、ZQT-2、ZQT-25 在没有外荷载干扰下的最大水平位移均小于其余长边测点,基坑体现出明显的空间效应。处于阴角的测点 ZQT-11 和与其相邻的测点 ZQT-12、ZQT-13 相比,最大水平位移较小,坑角效应显著。

图 6 展示了图 5 中桩体最大水平位移和各测点的开挖深度的关系,该基坑最大水平位移所在范围为 $0.0079\% H \sim 0.0404\% H$,平均值为 $0.0211\% H$ 。该值远小于以黏性土为主体的场地土的最大水平位移平均值 $0.339\% H^{[7]}$,但更接近于文献[8]所述同为土岩二元地层的 $0.1\% H$,说明土岩二元地层对围护桩有较好的嵌固作用。图 7 展示了围护桩最大水平位移出现的位置和开挖深度之间的关系,该基坑出现最大水平位移的位置在 $0.12061H \sim 0.86527H$,平均值为 $0.43945H$,约在中风化泥灰岩层内,远小于一般基坑工程的 $0.9H \sim H^{[9]}$ 。这是因为本项目场地土上软下硬,且土层厚度较小,场地主体为岩层,故最大水平位移出现的位置约在开挖深度的一半。

2.2.2 深基坑周边环境变形的空间效应

为了探究深基坑施工全过程中周边地表沉降,选取基坑南侧短边测点 DBC-14-2 和基坑西侧长边测点 DBC-18-2,图 8 为两个测点的沉降数据对比图。由图 8 可知,随着时间的推移基坑周边地表沉降逐渐增加。在开挖前期,由于大面积的土体开挖,场地土卸荷速率较快,稳定性不良,造成地表沉降增幅较大,开挖后期的地表沉降增幅减缓并趋于稳定,在开挖过程中基坑长边的地表沉降要大于基坑短边,说明土岩二元地层基坑具有明显的空间效应。

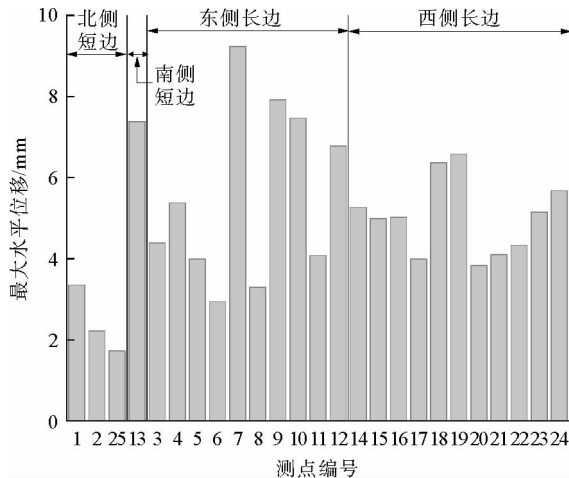


图5 围护桩测点最大水平位移

Fig. 5 Maximum horizontal displacement of measuring points on enclosure piles

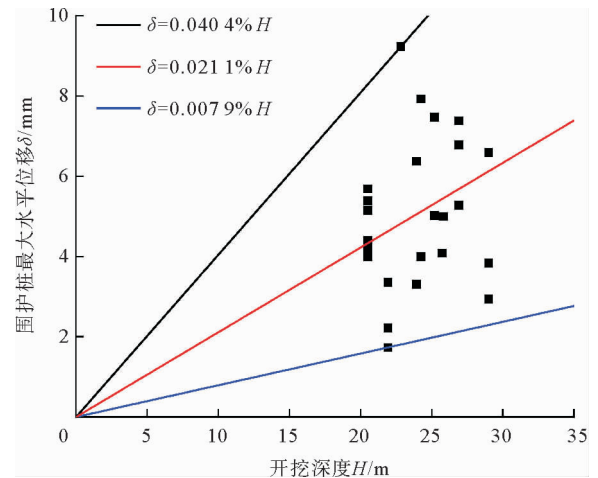


图6 围护桩最大水平位移和开挖深度关系

Fig. 6 Relationship between maximum horizontal displacement of enclosure pile and excavation depth

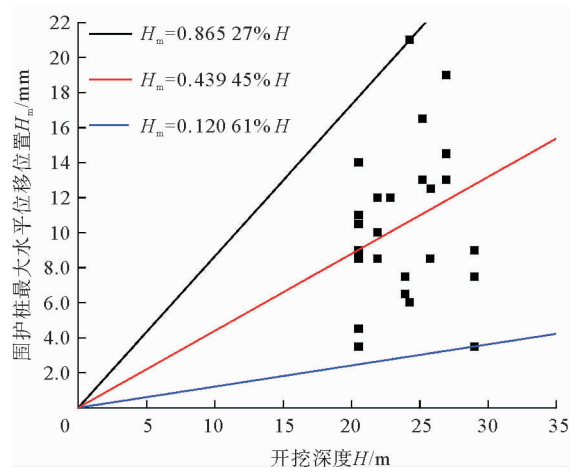


图7 围护桩发生最大水平位移位置和开挖深度关系

Fig. 7 Relationship between the position happening maximum horizontal displacement of enclosure piles and excavation depth

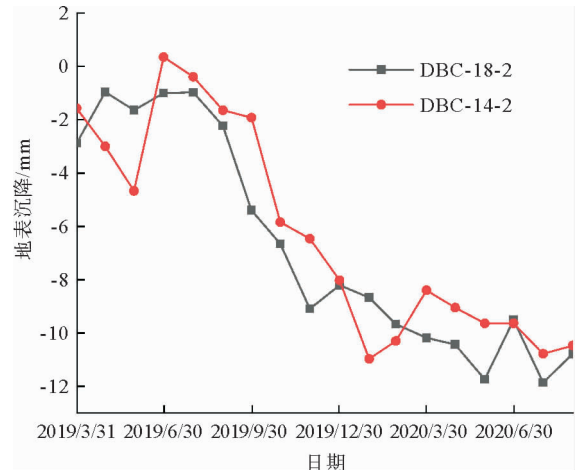


图8 开挖过程测点地表沉降对比

Fig. 8 Comparison of surface settlement of measuring points during construction

图9建立了测点 DBC-1~DBC-26 的地表沉降最大值和开挖深度的关系。由图9可知,该基坑地表沉降的范围为 $0.0089\%H \sim 0.0624\%H$, 平均值为 $0.0319\%H$, 而 Clough^[10] 得到的砂土地层中基坑周边的最大沉降量高达 $0.15\%H$ 。这表明,虽然场地表面仍为杂填土、黏土之类的较弱土层,但岩层增强了场地表面土抗变形能力,说明场地土的组成是影响地表沉降的主要因素之一。

3 数值模型建立和验证

基于 MIDAS/GTS 建立三维数值模型。基坑几何参数取自本工程设计资料,同时将不均匀土体简化为均厚土体分布。考虑到基坑开挖影响范围,在水平面上沿着基坑边界向外扩展 3 倍的开挖深度作为模型水平边界,即为 100 m。在竖直面上沿着基坑坑底向 z 轴负方向扩展 2 倍的开挖深度作为模型竖直边界,即为 70 m。采用混合网格划分实体模型,共形成 62 235 个节点和 81 654 个单元,如图 10。为保证交通通畅,在三环南路方向第一道支撑上设置军用行道梁,并建立三环南路道路模型。北京路方向的预制盖板未建立实体模型,而是将路面荷载等效为线荷载布置在支撑上。

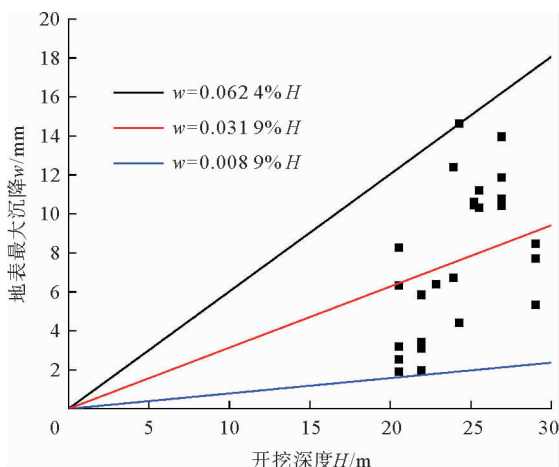


图9 最大地表沉降和开挖深度关系

Fig. 9 Relationship between maximum surface settlement and excavation depth

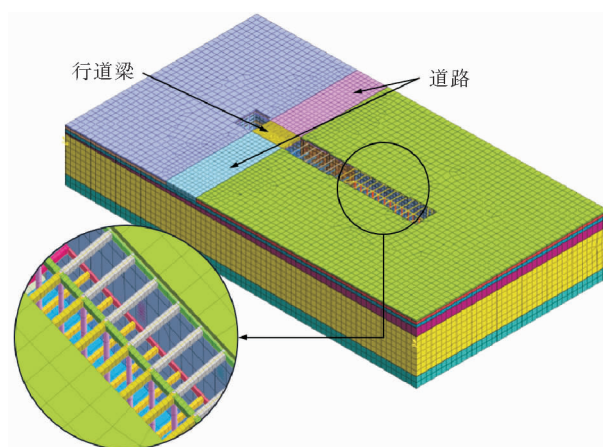


图10 基坑模型

Fig. 10 Model of foundation pit

3.1 本构模型和材料参数的选取

MIDAS/GTS 材料库所包含的岩土体本构模型包括莫尔-库伦模型、修正莫尔-库伦模型、德鲁克-普拉格模型、小应变硬化土模型等。莫尔-库伦模型在线弹性模型基础上引入了莫尔-库伦破坏准则,考虑土体的塑性变形行为,该模型所需参数获取方便,但不能考虑土体的非线性特性和加载卸载时的模量差异,故只能用于初步分析^[11]。德鲁克-普拉格模型修改了莫尔-库伦模型的屈服面函数,使其有更强的可程序化特性,但没有解决莫尔-库伦模型本身的缺陷^[12]。修正莫尔-库伦模型在莫尔-库伦模型的基础上发展而来,模型中包含了两类屈服面,以考虑体积塑性应变和剪切塑性应变^[13],该模型需通过三轴固结排水剪切试验和三轴试验确定割线刚度 E_{50} 、切线刚度 E_{oedref} 和卸载弹性模量 E_{urref} 。小应变硬化土模型继承了修正莫尔-库伦模型的优点,并能考虑剪切模量在微小应变范围内随应变衰减的行为^[14],但该模型需要引入参考初始模量 $G_{0\text{ref}}$ 。考虑到模拟的准确性,采用小应变硬化土模型作为岩土体的本构模型。表2为根据设计资料和《工程地质手册(第五版)》^[15] 相关经验数据获取的场地土的材料参数。其中, ν 为泊松比, φ 为摩擦角, c 为黏聚力, K 为渗透系数, P 为重度。 E_{50} 、 E_{oedref} 、 E_{urref} 、 $G_{0\text{ref}}$ 和土体压缩模量 E_s 之间存在一定的经验关系,本研究采用文献^[16]所提供的关系式,即 $G_{0\text{ref}} = 1.5 E_{\text{urref}} = 6 E_{\text{oedref}} = 6 E_{\text{urref}} = 6 E_s$ 。

表2 场地土的材料参数

Tab. 2 Material parameters of soil in site

土层	E_{50}/MPa	$E_{\text{oedref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{urref}}/\text{MPa}$	$G_{0\text{ref}}/\text{MPa}$	ν	$\varphi/(^{\circ})$	c	$K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$P/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
杂填土	4.21	4.21	16.84	25.26	0.32	16.5	0.014 4	0.010	19.5
黏土	10.98	10.98	43.92	65.88	0.42	18.5	0.039 5	4.9×10^{-6}	19.7
中风化泥灰岩	75.00	75.00	300.0	450.0	0.30	20.0	0.180 0	4.03×10^{-3}	24.0
中风化灰岩	100.00	100.00	400.0	600.0	0.17	30.0	0.700 0	4.03×10^{-3}	26.8
中风化闪长斑岩	700.00	700.00	2 800	4 200	0.30	20.0	0.180 0	4.03×10^{-3}	25.5

围护结构采用弹性模型,具体参数见表3。围护桩根据式(1)等效为地连墙,其中,间距为2 m的围护桩等效为660 mm厚地连墙,间距为1.5 m的围护桩等效为690 mm厚地连墙。道路不是本研究的研究对象,故仅建立路面的结构层模型,其弹性模量 $E = 3.1 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、泊松比 $\nu = 0.15$ 、重度 $P = 24 \text{ kN/m}^3$,有

$$\frac{(D+d)h^3}{12} = \frac{\pi d^4}{64} \quad (1)$$

式中: D 为围护桩间距, d 为围护桩直径, h 为等效地连墙厚度。

3.2 荷载和边界条件

除自重外,参考设计资料,将施工中可能出现的施工荷载等效为 20 kN/m^2 的地面超载均匀施加在场地土表面。地下水位根据勘察资料设为地表下 20 m 。文献[17]指出临近基坑的道路车辆对基坑围护结构的变形有一定影响,故在道路模型和行道梁模型上施加均布面荷载作为车辆荷载,荷载值依据文献[18]取 28 kN/m^2 。场地模型顶面为自由边界,侧面约束其法向位移,底面限制位移发生。

3.3 模型验证

选取工况 5 条件下基坑北侧测点 ZQT-1,南侧测点 ZQT-13,西侧测点 ZQT-16 和东侧测点 ZQT-9,对比模拟结果和监测数据以验证数值模拟的准确性,见图 11。由图 11 可知:①模拟结果在 $10\sim 15\text{ m}$ 范围内出现 1 次明显的位移突变,这是由于该位置存在第 2 道支撑,限制了围护桩变形的发展。同时,因为模拟施加的地面超载可能大于实际超载,导致围护桩顶部水平位移的模拟值大于监测值。但模拟所得围护桩变形形态相近;②模拟值和监测值均显示围护桩在穿过土层后,单位深度的水平位移减小,模拟结果与实际情况有相似的规律性。由于数值模拟无法与施工进度保持完全一致,且施工中可能出现偶然荷载如扰动、机具碰撞等,致使模拟结果与实际情况存在部分差距。但模拟所得的围护结构变形规律和数值与监测结果的误差均控制在一定范围之内,说明数值模型是合理的。

表 3 围护结构材料参数

Tab. 3 Material parameters of enclosure structure

构件	材料	E/MPa	ν	$P/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
立柱桩、围护桩	C35	3.10×10^4	0.2	25.0
混凝土支撑	C30	3.00×10^4	0.2	25.0
钢腰梁	Q235B	2.06×10^5	0.3	78.5

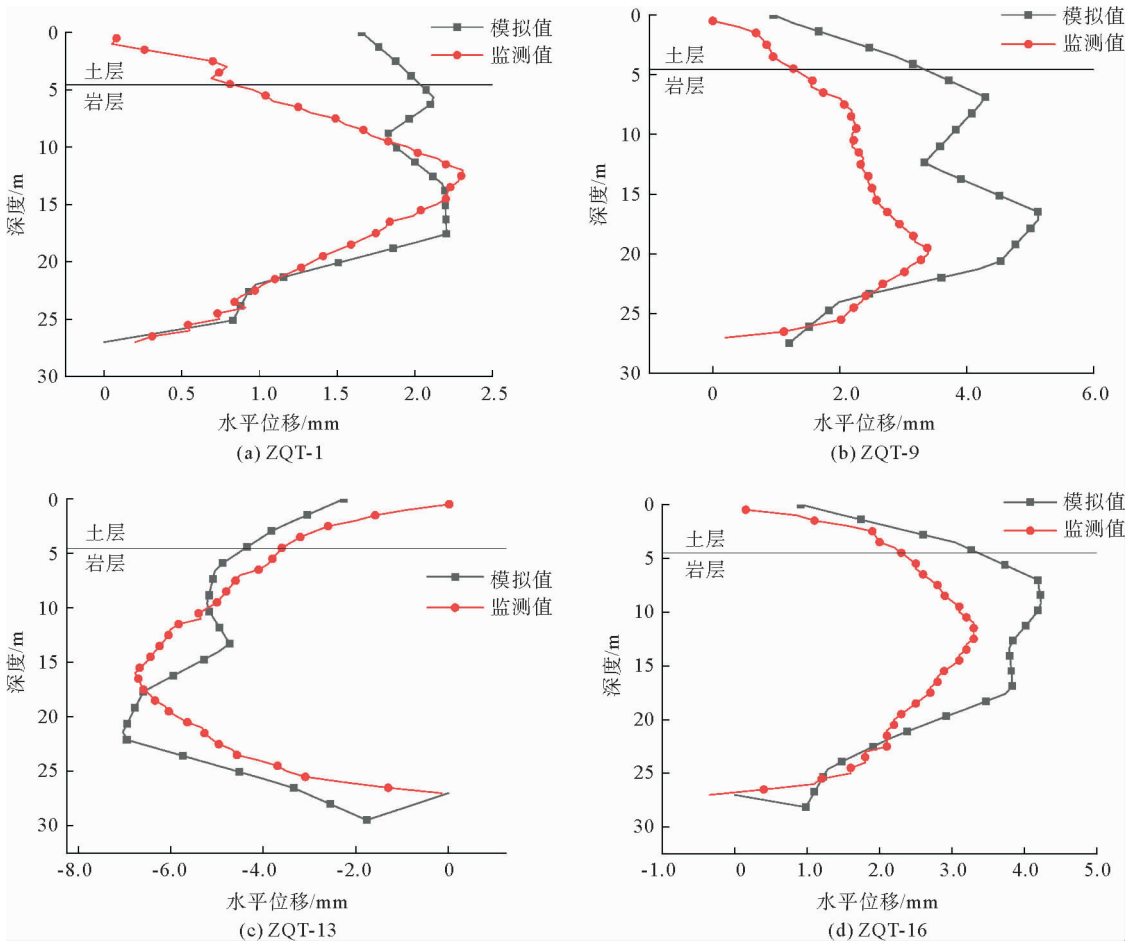


图 11 围护桩水平位移数值结果和监测数据对比

Fig. 11 Comparison of simulation results and monitoring data of horizontal displacement of enclosure piles

表4为不同工况下基坑内支撑轴力变化模拟值和监测值。选取的测点为ZCL-1和ZCL-8,前者从工况3开始工作,后者从工况2开始工作,测点所在支撑的设计轴力分别为600和400 kN,通过监测所得的支撑轴力变化量可计算实际轴力。由表4可知,在开挖全过程中,支撑轴力的模拟值和监测值相近,进一步证明了模拟结果的有效性。

表4 基坑内支撑轴力模拟结果和监测数据

Tab. 4 Simulation results and monitoring data of inner supports' axial forces

kN

工况	ZCL-1 模拟值	ZCL-1 监测值	ZCL-8 模拟值	ZCL-8 监测值
工况 2	—	—	-435	-436
工况 3	-731	-748	-555	-565
工况 4	-800	-766	-594	-560
工况 5	-1 010	-1 020	-587	-583

4 基于数值模型的深基坑空间效应研究

4.1 不同土层刚度对基坑空间效应的影响

土岩二元地层中土层和岩层的刚度差异较大,为探究场地土环境对基坑空间效应的影响,设 R 为岩层刚度放大系数,将岩层的 E_{50} 放大 R 倍,当 R 分别取0.5、1和2时,对比3种情况下基坑长边中点围护桩ZQT-6和短边中点围护桩ZQT-1在工况6条件下的水平位移,见图12(a)。

由图12(a)可知,刚度放大系数的增加没有改变围护桩组合式变形的变形形态,但随着刚度放大系数的增大,围护桩的土层和岩层交界面处的位移变化速率增加,围护桩的水平位移发生突变。随着刚度放大系数按倍数增长,ZQT-6的最大水平位移依次为-0.45、-1.03和-2.05 mm,围护桩的最大水平位移之间存在相近的倍数关系。同时,随着刚度放大系数的减小,基坑长边围护桩和短边围护桩的水平位移的差异性逐渐增大,基坑的空间效应更加显著。

图12(b)为同刚度放大系数下基坑周边地表沉降,所选用的测点为距行道梁南北两侧最近的4个阳角和基坑边界4个阴角。对比结果表明,随着刚度放大系数的增加,基坑周边地表沉降更加明显,但是刚度放大系数的增加并没有明显改变基坑阳角和阴角的沉降位移之差,空间效应并没有显著增加。

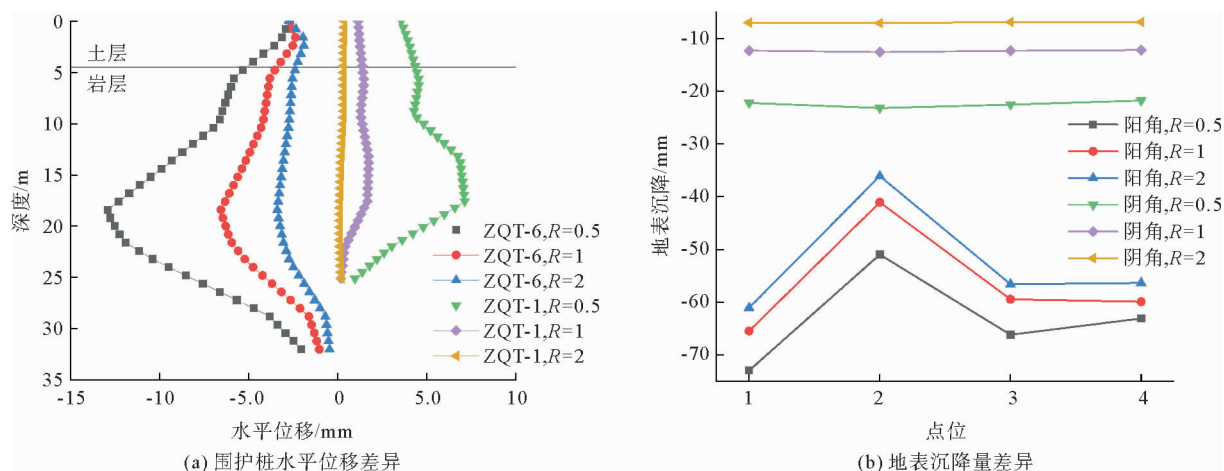


图12 不同刚度放大系数下基坑空间效应的差异

Fig. 12 Difference of space effect of foundation pit under different stiffness amplification factors

图13为工况6条件下不同刚度放大系数下围护桩的内力变化。由图13可见,随着刚度放大系数的减小,围护桩的弯矩逐渐增大,基坑短边围护桩的正弯矩作用更加明显。围护桩弯矩共出现4个极值。当围护

桩处于土岩交界面时,弯矩出现第1个极值。当围护桩从中风化泥灰岩层进入中风化灰岩层时,弯矩出现第2个极值,该值与第1个极值在数值上相近。弯矩的第3和第4极值因岩层嵌固作用而出现。图13表明不同场地土的交界面处、围护桩嵌固端附近区域以及围护桩在各层场地土中的中间区域为围护桩受力的薄弱区域。同时,土层和岩层的交界处刚度变化大,但在内力变化上与刚度变化较小的中风化泥灰岩和中风化灰岩交界处相差不大。

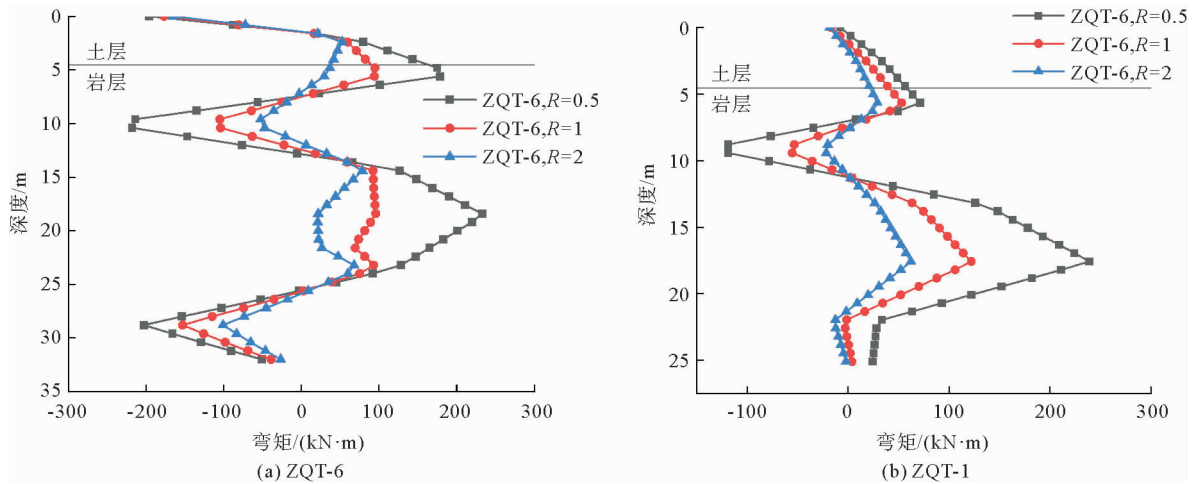


图13 不同刚度放大系数下基坑围护桩弯矩的差异

Fig. 13 Difference of bending moment of enclosure piles under various stiffness amplification factors

4.2 不同施工顺序对基坑空间效应的影响

在相同参数和基坑模型条件下,采用分层不分区开挖施工顺序,依次开展1~4层的开挖,每开挖一层即做好相应的支护工作。将该施工顺序所得的基坑长边围护桩ZQT-6和短边围护桩ZQT-1的水平位移与本项目所采用的分层分区开挖方式相对比,所采用的地表沉降测点与2.1节相同。二者均对比最后一个施工工况下的基坑变形。

图14为不同施工顺序下基坑空间效应的差异。由图14可知:施工顺序的改变不会影响围护桩的变形规律,即在土层和岩层交界面处发生位移突变;本项目所采取的分区分层的开挖方式具有更好的稳定性,施

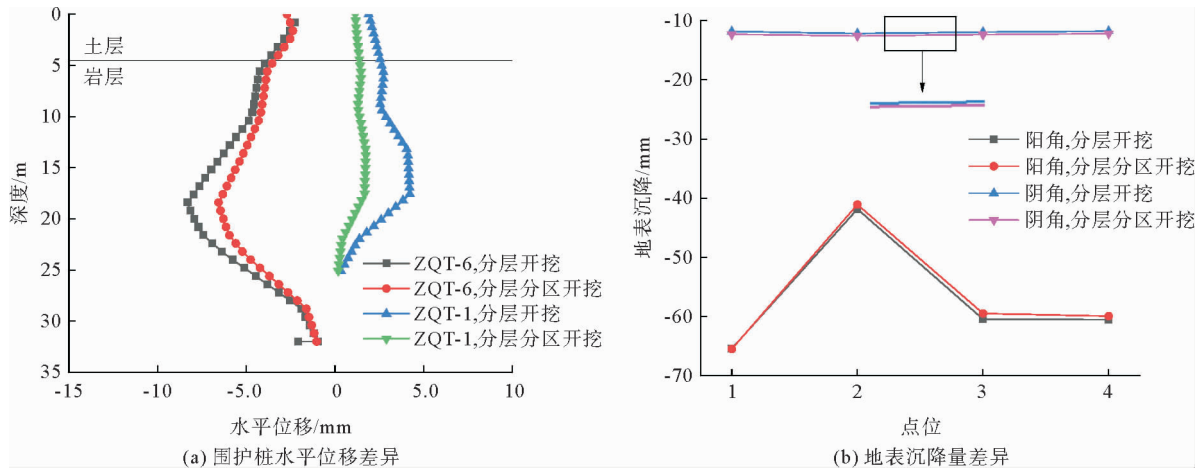


图14 不同施工顺序下基坑空间效应的差异

Fig. 14 Difference of space effect of foundation pit under different construction procedures

工顺序对基坑的空间效应有一定的影响,分层开挖的施工顺序放大了基坑长边和短边、阴角与阳角的空间效应,故在设计过程中应考虑土岩二元地层基坑的施工顺序。

5 结论

1) 本研究中土岩二元地层深基坑有明显的空间效应,其围护桩最大水平位移平均值和最大水平位移出现位置平均值分别为开挖深度 H 的 0.0211% 倍和 0.43945 倍,要明显小于一般土质基坑的 $0.9H \sim H$ 。且受岩层的影响,场地表面土体的沉降量平均值为 $0.0319\% H$,也远小于土质基坑,说明土岩二元地层深基坑的变形特性不同于土质基坑,有更好的稳定性。

2) 随着刚度放大系数的减小,围护桩侧移在基坑长边和短边的空间效应更加明显,围护桩的最大水平位移和弯矩有线性增大的趋势,但围护桩的变形特性不受土层和岩层刚度差异的影响。同时,基坑周边地表沉降随着刚度放大系数的减小逐渐增大,但基坑坑角处的空间效应变化并不显著。

3) 通过对围护桩的内力分析发现,在场地土层的交界面处、围护桩嵌固端附近区域以及围护桩在各层场地土中的中间区域为围护桩的薄弱区域。

4) 分层开挖的施工顺序放大了基坑长边和短边、阴角和阳角的空间效应,说明施工顺序对基坑空间效应有重要影响,在设计时应将其纳入设计范围之中。

参考文献:

- [1] 张旷成,李继民.杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J].岩土工程学报,2010,32(增1):338-342.
ZHANG Kuangcheng, LI Jimin. Accident analysis for “08.11.15” foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338-342.
- [2] 刘建航,刘国彬,范益群.软土基坑工程中时空效应理论与实践(上)[J].地下工程与隧道,1999(3):7-12.
LIU Jianhang, LIU Guobin, FAN Yiqun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 7-12.
- [3] 刘燕,刘国彬,孙晓玲,等.考虑时空效应的软土地区深基坑变形分析[J].岩土工程学报,2006(增1):1433-1436.
LIU Yan, LIU Guobin, SUN Xiaoling, et al. Analysis of deformation laws by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(S1): 1433-1436.
- [4] 周一波,汪仁圣,胡卫东,等.红黏土地区深基坑变形特性的时空效应研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(3):122-133.
ZHOU Yibo, WANG Rensheng, HU Weidong, et al. Study on temporal-spatial effect of deformation characteristics of deep foundation pit in red clay soil region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 122-133.
- [5] 杜磊,王育平,明德志.基坑卸荷开挖对下卧地铁隧道影响的数值分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(6):62-67.
DU Lei, WANG Yuping, MING Dezhi. Numerical analysis of influence of pit unloading on underlying metro tunnel[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(6): 62-67.
- [6] 商大勇.土岩组合地层地铁车站深基坑阳角变形及稳定性[J].北京交通大学学报,2020,44(6):25-33.
SHANG Dayong. Deformation and stability of the convex corners in deep foundation pit in subway station with soil-rock combined strata[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6): 25-33.
- [7] 丁智,王达,王金艳,等.浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J].岩土力学,2015,36(增1):506-512.
DING Zhi, WANG Da, WANG Jinyan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 506-512.
- [8] 林之航.上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1792-1800.
LIN Zhihang. Research on deformation and spatial effect of upper-soft and lower-hard deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1792-1800.
- [9] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].北京:中国建筑出版社,2009:183-211.

- [10] CLOUGH G W. Construction induced movements of in situ wall[J]. Geotechnical Special Publication, 1990, 25: 439-470.
- [11] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86-94.
SONG Guang, SONG Erxiang. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 86-94.
- [12] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264.
XU Zhonghua, WANG Weidong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258-264.
- [13] XU H, SCHWEIGER H F, HUANG H. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(2): 170-180.
- [14] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [15] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2018: 145-182.
- [16] 宫志群, 唐聪, 龚益军, 等. 基坑及隧道群施工对邻近建筑物的叠加影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增2): 752-761.
GONG Zhiqun, TANG Cong, GONG Yijun, et al. Study on the superimposed impact of foundation pit and tunnel group construction on adjacent building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 752-761.
- [17] 丁森林, 钱德玲, 戴启权, 等. 车辆荷载影响下深基坑开挖稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(5): 671-676.
DING Senlin, QIAN Deling, DAI Qiquan, et al. Analysis on the stability of deep foundation pit excavation under vehicle loads[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(5): 671-676.
- [18] 王加灿, 王志杰, 韩建刚. 车辆荷载的数值等效在基坑设计中的研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(4): 87-93.
WANG Jiakan, WANG Zhijie, HAN Jiangang. Study on equivalent vehicle load in retaining and protection design of excavation[J]. Structural Engineers, 2014, 30(4): 87-93.

(责任编辑: 吕海亮)