

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023051224021982

文章编号: 1674-599X(2023)06-0099-08

引用格式: 熊胜, 范传刚, 凌涛, 等. 风化岩土质的地铁基坑开挖仿真研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 99-106.

Citation: XIONG Sheng, FAN Chuangang, LING Tao, et al. Simulation study on the excavation of subway foundation pits in weathered rock and soil[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 99-106.

# 风化岩土质的地铁基坑开挖仿真研究

熊胜<sup>1,2</sup>, 范传刚<sup>1</sup>, 凌涛<sup>2,3</sup>, 乔世范<sup>1</sup>, 王正军<sup>4</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 410000;  
3. 中铁五局集团第一工程有限责任公司, 湖南 长沙 410117; 4. 长沙市财政评审中心, 湖南 长沙 410023)

**摘 要:** 为研究风化岩土质深基坑在开挖过程中的变形演化规律, 以长沙市某地铁深基坑工程为依托, 用PLAXIS 3D软件建立三维数值模型, 分析基坑开挖深度、载荷位置、载荷大小对深基坑开挖过程变形的影响规律。研究结果表明: 风化岩土质地铁基坑在开挖过程中, 其形变主要发生在土层。当载荷 20 kN/m<sup>2</sup> 且距离基坑为 5 m 时, 围护桩的最大偏移 0.72 mm; 当载荷达到 60 kN/m<sup>2</sup> 时, 地表的沉降为 70.90 mm。该结果可为类似风化岩土质基坑设计提供参考。

**关键词:** 基坑开挖; 土岩组合; 竖向位移; 三维有限元

中图分类号: TU 47

文献标志码: A

## Simulation study on the excavation of subway foundation pits in weathered rock and soil

XIONG Sheng<sup>1,2</sup>, FAN Chuangang<sup>1</sup>, LING Tao<sup>2,3</sup>, QIAO Shifan<sup>1</sup>, WANG Zhengjun<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. China Railway No.5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410000, China; 3. China Railway Fifth Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Changsha 410117, China; 4. Changsha Financial Evaluation Center, Changsha 410023, China)

**Abstract:** To study the deformation evolution of weathered rock and soil strata in deep excavation pits, Based on a subway deep excavation project in Changsha, a three-dimensional numerical model was established by using PLAXIS 3D. The influence of excavation depth, load position, and load magnitude on the deformation of deep excavation pits during the excavation process were analyzed. The research results indicate that in the excavation process of subway foundation pits in weathered rock and soil, deformation mainly occurred in the soil layer. When the load of 20 kN/m<sup>2</sup> and 5 m away from the pit, the maximum lateral displacement of the retaining pile was 0.72 mm. When the load reaches 60 kN/m<sup>2</sup>, the maximum settlement of the ground surface was 70.9 mm. These results can serve as a reference for the design of foundation pits in similar weathered rock and soil conditions.

**Key words:** excavation of foundation pits; soil rock combination; vertical displacement; three-dimensional finite element

收稿日期: 2023-05-12

作者简介: 熊胜(1982—), 男, 中南大学博士生。E-mail: xiong-mail@qq.com

随着城市化的快速发展,轨道交通逐渐成为人们出行的首选公共交通工具。深基坑是地铁建设中面临的主要难题之一,在城市中,深基坑周围环境复杂,并且施工面积很窄。同时,基坑开挖会破坏基坑周围土壤的应力状态,使得土壤的应力及应变发生改变,导致地面出现沉降<sup>[1]</sup>。学者们针对深基坑开挖进行了大量研究。刘红军等<sup>[2]</sup>发现适度增加桩的埋深可控制支护的横向位移和地面沉降,岩肩宽度影响基坑变形。文杰等<sup>[3]</sup>指出,共墙深基坑开挖导致基坑远侧围护结构变形和周边地表沉降增加;相邻建筑深基坑开挖对共墙侧围护结构变形有一定恢复效应。张鹏<sup>[4]</sup>研究发现,地表临近荷载对基坑支护和基底土体回弹变形影响显著,基坑板桩墙水平位移和腰梁水平位移随地表荷载增加而增大。吴双武等<sup>[5]</sup>研究表明:不同工况下,内支撑变形和应力有所不同,但变化趋势相似。挡土桩的最大侧向位移位置随最大弯矩位置下降而减小。童建波等<sup>[6]</sup>研究表明:基坑开挖到土岩结合面时,因桩体不能有效嵌固,围护结构存在显著位移,但可采用锚索支护结构解决。张军等<sup>[7]</sup>研究表明:偏压作用下非偏压侧的桩身水平位移大于偏压侧的,偏压与非偏压的两侧地表沉降呈现明显的空间效应,偏压侧的坑周地表最大沉降大于非偏压侧的。刘维正等<sup>[8]</sup>研究表明:基坑长边中部最不利,变形和受力最大;土质为红砂岩时,空间效应影响范围大致为开挖深度的5倍左右,且随深度增加而增大。程鑫等<sup>[9]</sup>研究发现,降雨渗入导致堆积层坡体和平行坡体向穿越坡体的隧道衬砌结构的应力和变形增加。何忠明等<sup>[10]</sup>研究表明:设计同类型基坑时,应重视支撑层数的选择,必要时可适当减小支护结构的厚度。

针对基坑及周围土体变形的研究中,郑学东<sup>[11]</sup>模拟了青岛地铁苗岭路地铁站的基坑开挖过程,可为地铁站的设计和施工提供指导。汤智钧<sup>[12]</sup>发现,在基坑开挖过程中,通过加固坑底搅拌桩显著减少了地铁站附属结构的位移,坑底搅拌桩加固对控制地铁站附属结构变形有显著作用。郭康<sup>[13]</sup>分析了基坑与管线间距、开挖深度和管线深度对管道变形的影响。曾力等<sup>[14]</sup>分析了土岩组合地层中土岩分界面上下岩土黏聚力、内摩擦角和弹性模量、土岩交界面位置及围护桩的深埋深度等因素对隧道变形的影响规律。李毅等<sup>[15]</sup>发现,对于类

似边坡应预加固再开挖,且预加固措施应优先选择脉动灌浆方法,以提高边坡的整体稳定性,降低边坡垮塌的风险。这些研究均表明:地质、地层、周围环境等因素对基坑开挖过程有较大影响,且基坑开挖具有明显的区域性和专一性。因此,基坑开挖过程需要针对不同土质进行有针对性地设计。本研究拟长沙市某地铁深基坑工程为依托,其土质结构以风化岩为主,采用PLAXIS 3D对基坑开挖过程进行建模,分析开挖深度、载荷位置、载荷大小对开挖过程中深基坑变形的影响规律,以为类似风化岩土施工过程提供借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑工程介绍

拟建造的地铁车站深大基坑工程位于湖南省长沙市,根据基坑开挖的深度和基坑周围环境,确定基坑垂直开挖深度为22.60 m,形状为矩形,主体围护结构采用围护桩,支撑采用梁结构型式,垂直开挖共分为4层,共设置梁4层,梁的水平间隔为6.00 m,如图1所示。

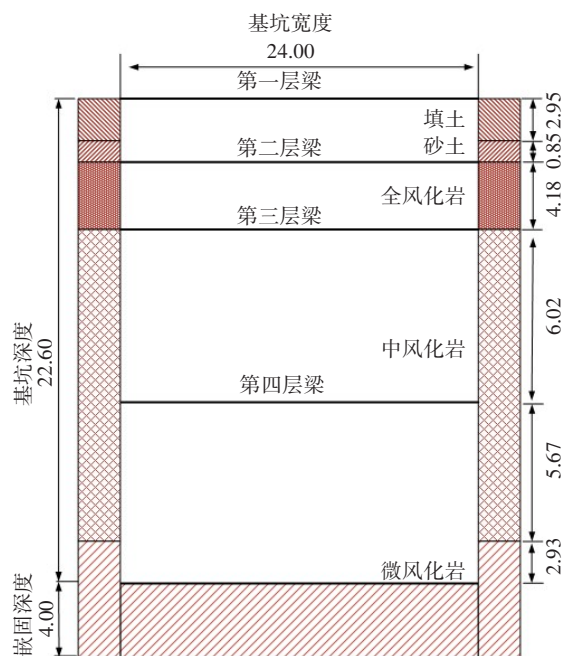


图1 基坑支护截面(单位:m)

Fig. 1 Section of foundation pit support(unit:m)

### 1.2 基坑地层特性

场地土质自上而下由杂填土、砂土、强风化砂

岩、中风化砂岩和微风化砂岩组成,杂填土的厚度为 2.95 m,砂土的厚度为 0.85 m,强风化砂岩的厚度为 4.18 m,中风化砂岩的厚度为 11.69 m,微风化砂岩的厚度为 2.93 m,场地内的风化岩在土层中占比为 83%。各地层土质的物理力学参数见表 1~2。

表 1 土层的物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of soil layers

土质名称	土壤厚度/ m	重度/ (kN· m <sup>-3</sup> )	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角/ (°)	割线模 量 $E_{50}^{\text{ref}}$ / MPa	切线模 量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ / MPa	卸载再加 载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa
杂填土	0~ 2.95	18	14	12	7.5	7.5	22.5
砂土	2.95~ 3.80	18	3	39.8	8.9	8.9	26.7

表 2 岩石层的物理力学参数

Table 2 The physical and mechanical parameters of rock layers

土质名称	土壤厚度/m	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量 $E_s$ /MPa
强风化砂岩	3.8~7.98	21	80	45	200
中风化砂岩	7.98~19.67	26	900	42	4 140
微风化砂岩	19.67~22.60	30	1 200	57	17 000

## 2 数值模型建立

用 PLAXIS 3D 软件建立基坑开挖过程的三维有限元模型,如图 2 所示。考虑到简化计算可能导致计算结果出现偏差,对基坑整体进行建模,其尺寸大小为:长 192 m×宽 168 m×高 75 m,模型  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴分别对应基坑的长度、宽度、深度,基坑长度为 48.00 m,宽度为 24.00 m,深度为 22.60 m;土体硬化本构模型用来描述土层材料特性,Mohr-Coulomb 本构模型用来描述岩石层材料特性;排桩使用板单元模拟,板单元的相关参数由等刚度计算而来<sup>[16]</sup>,板和梁的相关参数见表 3。界面强度折减系数  $R_{\text{inter}}$  用来描述土体与结构之间的强度关系,填土、砂土、岩土层对应的  $R_{\text{inter}}$  分别为 0.75、0.70、1.00。

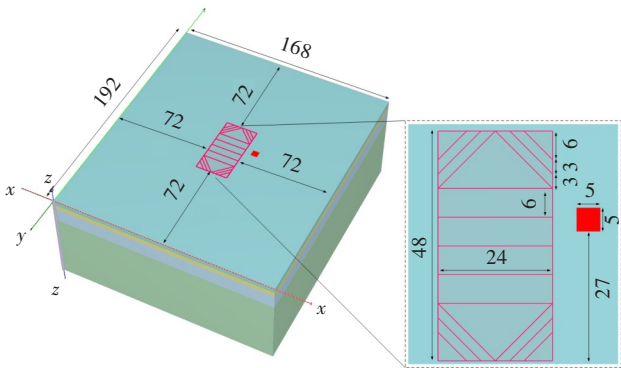


图 2 三维有限元模型(单位:m)

Fig. 2 Three-dimensional finite element model(unit:m)

土体硬化本构模型的参数有:

- 1) 刚度参数:  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为三轴固结排水卸载-再加载试验参考卸载模量;  $E_{50}^{\text{ref}}$  为三轴固结排水剪切试验的参考割线模量;  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  为侧限压缩试验参考切线模量。
- 2) 强度参数:  $\psi$  为剪胀角;  $c$  为黏聚力;  $\varphi$  为摩擦角。
- 3) 相关系数:  $m$  为应力相关系数;  $p^{\text{ref}}$  为参考围压。

相关系数的计算表达式为:

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (1)$$

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (2)$$

$$q_f = (c \cdot \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (4)$$

$$E_s = \frac{p_2 - p_1}{e_1 - e_2} (1 + e_1) \quad (5)$$

式中:  $\sigma'_3$  为三轴试验中有效最小主应力;  $m$  取 0.5;  $q_f$  由 Mohr-Coulomb 破坏准则来计算。

Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型 M-C 准则认为当材料某平面上剪应力达到某一特定值时,材料就进入屈服。它是剪应力屈服条件,其表达式为

$$\tau_n = f(c, \varphi, \sigma_n) \quad (6)$$

式中:  $c$  为材料的黏聚力;  $\varphi$  为材料的内摩擦角;  $\sigma_n$  为该平面上的正应力。

式(6)的函数关系式通过试验确定,其实际表达式为

$$\tau_n = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (7)$$

表 3 板单元参数

Table 3 Parameters of plate unit

重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E_1/\text{GPa}$	泊松比	等效厚 度/m	剪切模量 $G_{12}/\text{GPa}$
25	30.0	0.2	1.0	12.5

表 4 梁单元参数

Table 4 Parameters of beam element

重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E_1/\text{GPa}$	惯性矩 $I_3/\text{m}^4$	惯性矩 $I_2/\text{m}^4$	截面积 $A/\text{m}^2$
15	32.5	0.055 5	0.146	1.04

在“高粗”“粗”“中等”3种网格粗细程度下最大地表沉降结果发现:随着网格粗细程度的增加,所监测的数值差在5%以内,且随着网格的细化,误差越来越小,故可以使用“粗”网格来进行数值模拟,该网格包含121 232个节点,80 437个单元。

基坑分层开挖,开挖后的土层设置为“干”,同时不考虑地下水的影响,施工阶段见表5。

表 5 基坑施工阶段

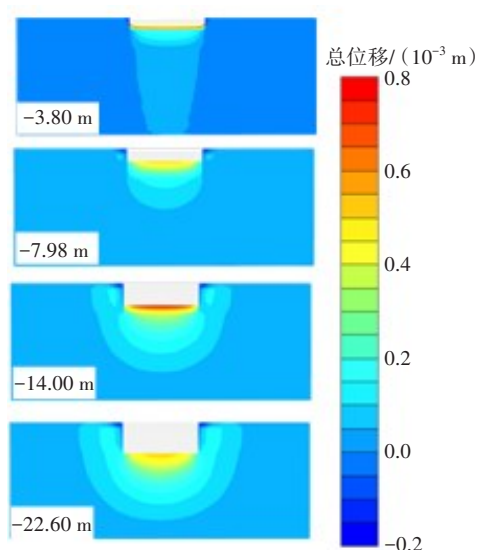
Table 5 Construction stage of foundation pit

阶段	施工项目
工况 1	初始阶段
工况 2	施工排桩,激活界面,激活梁
工况 3	开挖到-3.80 m,设置水头为干
工况 4	施工钢梁以及围檩
工况 5	开挖到-7.98 m,设置水头为干
工况 6	施工钢梁以及围檩
工况 7	开挖到-14.00 m,设置水头为干
工况 8	施工钢梁以及围檩
工况 9	开挖到-22.60 m,设置水头为-22.60 m

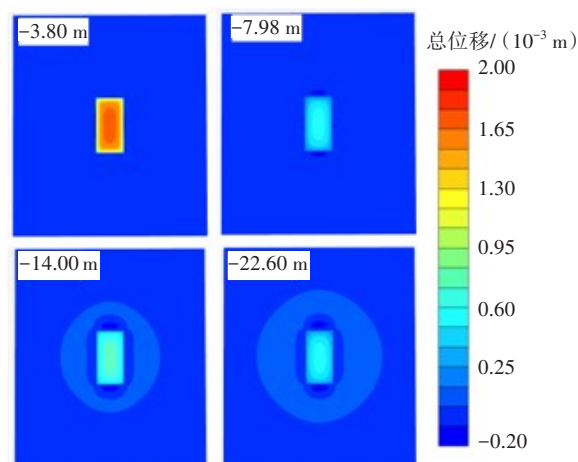
## 3 结果与分析

### 3.1 开挖深度的影响

开挖深度对土体位移的影响,图3分别为基坑开挖至-3.80、-7.98、-14.00、-22.60 m时的竖直方向位移和地表的总位移云图。从图3(a)可以看出,最大地表沉降发生在基坑边缘,随着基坑开挖,基坑边缘沉降区域变大,在围护桩附近开始出现沉降区域且面积逐渐变大。从图3(b)可以看出,随着基坑开挖,地表沉降幅度及沉降范围越来越大。



(a) 竖直方向上的总位移云图



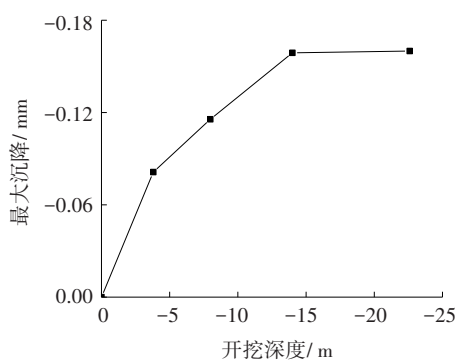
(b) 地表的总位移云图

图 3 不同开挖过程的位移云图

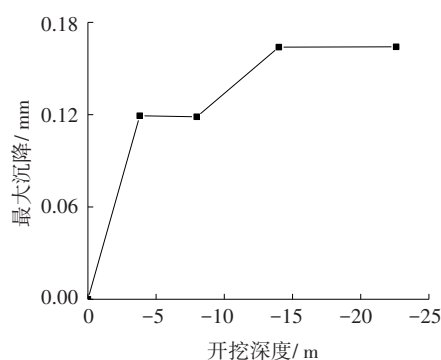
Fig. 3 Contour of displacement under different excavation processes



图4为最大沉降随开挖深度的变化关系。图4(a)为竖直方向上的最大沉降,从图4(a)可以看出,当从土质层向岩石层转变时,最大沉降随开挖深度的增加其增加速率变慢;当开挖至中风化岩时几乎没有沉降,表明:以中和微风化岩的土层为施工对象时,沉降可以不考虑土体沉降影响。从图4(b)可以看出,当由土层开挖至岩层时,几乎没有沉降。随着岩层的开挖,最大沉降变大,但增加的速率小于土层的速率。当开挖至中风化岩土层时,地表最大沉降几乎不变。根据岩土特性,开挖过程分为4步:开挖土层,开挖全分化岩,开挖部分中风化岩,开挖至微风化岩。受到岩土不同的物理力学参数的影响,从全风化岩至微风化岩的弹性模量是按量级增加的,使得开挖至风化岩后土体的形变越来越小。



(a) 竖直方向上的最大沉降



(b) 地表的最大沉降

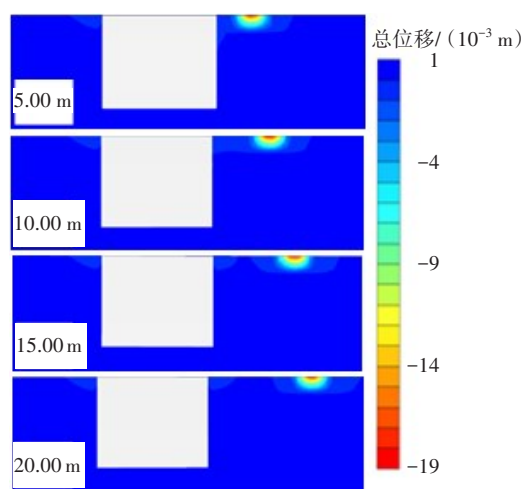
图4 开挖过程的土体形变

Fig. 4 Soil shape variables during excavation process

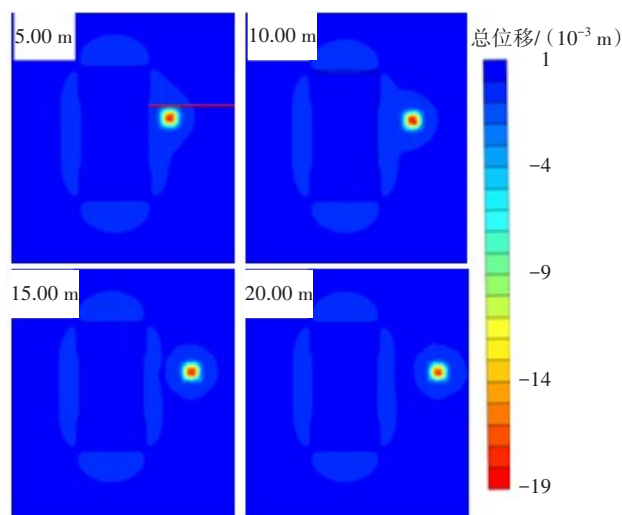
### 3.2 载荷位置的影响

为研究地表载荷位置对基坑开挖的影响,本研究设计了载荷距离坑边分别为5.00、10.00、15.00和20.00 m 4种开挖工况,载荷恒定为 $20 \text{ kN/m}^2$ ,载荷面

积为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。图5为土体位移云图。从图5(a)可以看出,发生沉降的土层主要是填土与砂土,载荷面附近的最大沉降达到了 $19.00 \text{ mm}$ ;随着载荷距离的增加,载荷对基坑影响变小;当载荷与基坑距离达到 $15.00 \text{ m}$ 时,载荷几乎影响不到基坑周围土体。从图5(b)可以看出,地表沉降幅度随载荷距离的变化关系。载荷仅仅对其所在的基坑侧有影响,无载荷基坑侧发生地表沉降的范围为 $7.50 \text{ m}$ ;在载荷距离为 $15.00 \text{ m}$ 时,载荷影响范围也是 $7.50 \text{ m}$ ; $19.00 \text{ mm}$ 深度的地表沉降范围随着载荷与基坑距离增大而减小。



(a) 竖直方向上的总位移云图



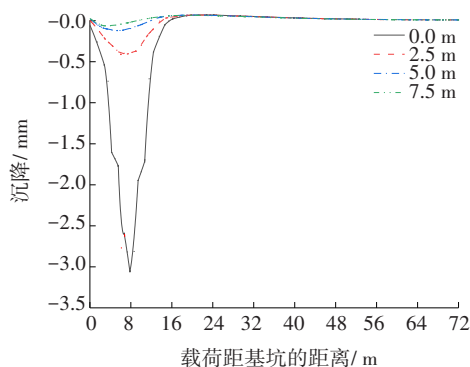
(b) 地表的总位移云图

图5 不同载荷距离下的位移云图

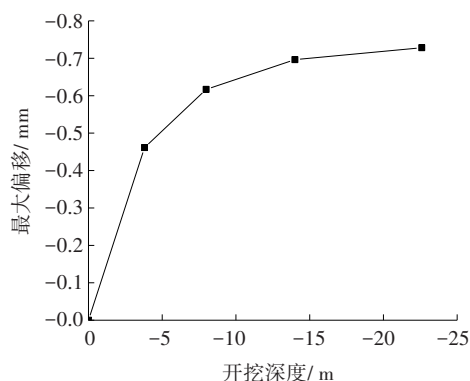
Fig. 5 Contour of displacement under different load distances

图6(a)为基坑与载荷 $5.00 \text{ m}$ 距离的情况,图5(b)中红线载荷距离为 $0.00 \sim 7.50 \text{ m}$ 范围的沉降情

况。从图6(a)可以看出,沉降随着红线与载荷的距离增大而减小;当红线与载荷距离为0.00 m时,在离基坑边缘8.00 m处,发生的最大沉降为3.00 mm;当载荷距离为2.5 m时,最大沉降减小至0.5 mm;随着载荷与基坑距离的增大,竖直方向上的土体先沉降至最大值,再发生小幅度的隆起,最后隆起逐渐衰减至0.00 mm。图6(b)为基坑与载荷距离为5.00 m工况时基坑开挖过程中板的最大偏移。从图6(b)可以看出,受到土质的影响,随着开挖深度的加大,其增加幅度是逐渐减小的;当开挖至22.60 m时,板最大偏移0.72 mm。加载载荷后的岩土形变展示了风化岩为主体的基坑开挖过程中的土体变化规律(载荷的影响集中在土层中)。尽管载荷距离围护桩仅5.00 m,对维护桩的影响却明显集中在土层中,无法通过风化岩进一步传递至围护桩。



(a) 竖直方向上红线处的最大沉降



(b) 开挖过程中围护桩的最大偏移

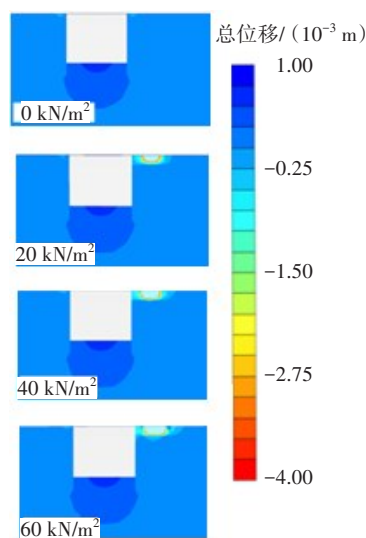
图6 基坑与载荷5 m距离下的土体形变量

Fig. 6 Soil shape variable under a distance of 5 m between the foundation pit and the load

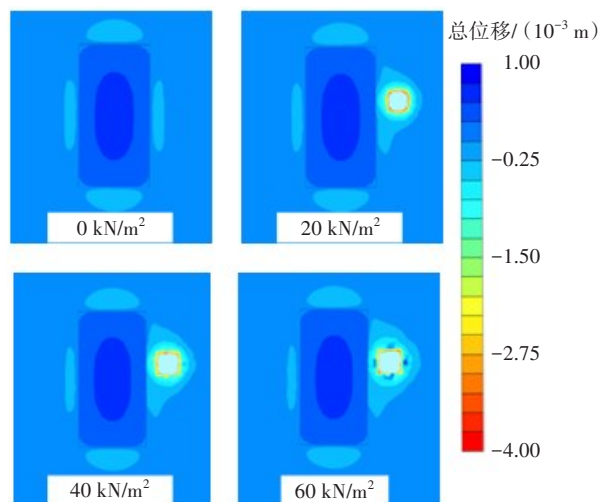
### 3.3 载荷大小的影响

为研究地表载荷位置对基坑开挖的影响,本研

究设计载荷距离坑边为5.00 m时的开挖工况,载荷面积为5 m×5 m,载荷大小为0、20、40和60 kN/m<sup>2</sup>。图7为载荷距离坑边为5.00 m时不同载荷时的位移云图。从图7可以看出,位移被控制在4.00 mm以内。从图7(a)可以看出,载荷对基坑底影响很小,随着载荷从0 kN/m<sup>2</sup>增加至60 kN/m<sup>2</sup>,基坑底一直保持约1.00 mm隆起;从载荷附近的位移云图可以看出,受影响的主要是土层,随着载荷的加大,载荷附近沉降加大,更多区域开始出现沉降;当载荷达到60 kN/m<sup>2</sup>时,岩石层开始受到影响,地表载荷位置会出现反常的隆起现象。从图7(b)可以看出,只有靠近载荷的基坑侧才会受到影响,随着载荷的增加,对地表的影响范围变大。



(a) 竖直方向上的总位移云图

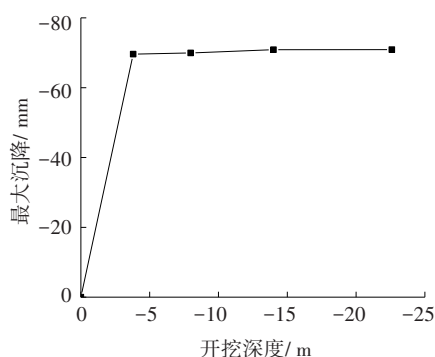


(b) 地表的总位移云图

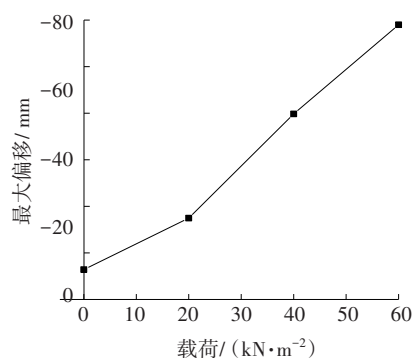
图7 不同载荷下的位移云图

Fig. 7 Contour of displacement under different loads

图8(a)为载荷达为 $60\text{ kN/m}^2$ 时,不同开挖深度下的沉降距离。从图8(a)可以看出,开挖至土层时,沉降速度较大,沉降距离可达 $69.60\text{ mm}$ ;当开挖至岩石层时,沉降速度明显减小,开挖至 $22.60\text{ m}$ 时沉降距离为 $70.90\text{ mm}$ 。图8(b)为不同载荷下的最大偏移距离,从图8(b)可以看出,随着载荷的增加,最大偏移随之增大,当载荷增加至 $60\text{ kN/m}^2$ 时发生 $1.59\text{ mm}$ 的最大偏移距离。载荷的增加,并不会影响到风化岩,甚至出现了明显的断层分布,最大沉降距离反应更为明显,因此,在开挖过程中应当注意土层的形变。



(a)  $60\text{ kN/m}^2$  载荷不同开挖深度的沉降距离



(b) 不同载荷下的围护桩的偏移距离

图8 土体的形变

Fig. 8 Soil deformation

## 4 结论

以长沙市某地铁深基坑工程为研究对象建立三维数值模型,分析不同开挖深度、不同载荷位置、不同载荷大小对深基坑开挖变形的影响规律。得到结论:

1) 在以风化岩为主要土质的地铁基坑开挖过

程中,形变主要发生在土层,当达到中风化岩土层时,最大地表沉降几乎不变。

2) 沉降主要发生在距离载荷中央 $10.00\text{ m}$ 的范围内。当载荷与基坑距离为 $5.00\text{ m}$ 时,板发生 $0.72\text{ mm}$ 的最大偏移量;当载荷与基坑距离达到 $15.00\text{ m}$ 时,载荷几乎影响不到基坑周围土体。

3) 载荷增加对基坑底的影响很小;当载荷达到 $60\text{ kN/m}^2$ 时,在岩石层才开始出现较大的沉降;在地表,最大沉降为 $70.90\text{ mm}$ ,且载荷位置会出现反常的隆起。

## 参考文献(References):

- [1] 石名磊. 基础工程[M]. 2版. 南京: 东南大学出版社, 2015.  
SHI Minglei. Foundation engineering [M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2015.
- [2] 刘红军, 李东, 孙涛, 等. 二元结构岩土基坑“吊脚桩”支护设计数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2009.05.007.  
LIU Hongjun, LI Dong, SUN Tao, et al. Numerical analysis on design of dualistic foundation pit with ‘end-suspended pile’ [J]. Journal of Civil Architectural Environmental Engineering, 2009, 31(5): 43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2009.05.007.
- [3] 文杰, 郭平, 孙梦尧, 等. 深基坑开挖对相邻共墙基坑影响规律研究[J]. 工程建设, 2022, 54(10): 1-6. DOI: 10.13402/j.gcjs.2022.10.121.  
WEN Jie, GUO Ping, SUN Mengyao, et al. Influence of deep foundation pit excavation on adjacent foundation pit with common underground continuous wall [J]. Engineering Construction, 2022, 54(10): 1-6. DOI: 10.13402/j.gcjs.2022.10.121.
- [4] 张鹏. 临近荷载下砂土地层基坑开挖土体变形及支护对策研究[J]. 建筑安全, 2022, 37(10): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2022.10.005.  
ZHANG Peng. Study on soil deformation and supporting countermeasures of foundation pit excavation in sandy soil under near load [J]. Construction Safety, 2022, 37(10): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2022.10.005.
- [5] 吴双武, 李辉, 许焯霜, 等. 深圳上软下硬地层中超深基坑的性状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 330-335.

- WU Shuangwu, LI Hui, XU Yeshuang, et al. Analysis on the performance of ultra-deep foundation pit in weathered rock ground covered by sand in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2):330-335.
- [6] 童建波, 潘晓东, 庄迎春. 某土一岩组合深基坑案例分析与治理[J]. 工程勘察, 2013, 41(4):19-24.
- TONG Jianbo, PAN Xiaodong, ZHUANG Yingchun. Study on deep excavation in soil-rock pit and supporting [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(4):19-24.
- [7] 张军, 崔会宁. 邻近边坡偏压深基坑开挖效应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 34-41. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.006.
- ZHANG Jun, CUI Huining. Analysis of excavation effect of deep foundation pit under eccentric pressure adjacent [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 34-41. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.006.
- [8] 刘维正, 葛孟源, 万家乐, 等. 考虑空间效应的桩锚支护深大基坑变形特性及影响因素数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12): 3188-3200. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20201212.
- LIU Weizheng, GE Mengyuan, WAN Jiale, et al. Numerical analysis of deformation characteristics and influencing factors of deep and large foundation pit considering spatial effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(12): 3188-3200. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20201212.
- [9] 程鑫, 张永杰, 罗志敏, 等. 降雨条件下隧道与堆积层边坡相互作用机理研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(1): 59-67. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210429001.
- CHENG Xin, ZHANG Yongjie, LUO Zhimin, et al. Research on deformation mechanism of tunnel crossing slope interaction under rainfall conditions[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(1): 59-67. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210429001.
- [10] 何忠明, 王盘盘, 王利军, 等. 超大深基坑开挖变形演化规律及优化设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3): 69-77. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.007.
- HE Zhongming, WANG Panpan, WANG Lijun, et al. Deformation evolution law and optimization design of huge deep foundation pit excavation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(3): 69-77. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.007.
- [11] 郑学东. 土岩组合地层有限岩土体基坑开挖变形研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHENG Xuedong. Research on excavation deformation of limited rock-soil foundation pit in strata with soil and rock[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [12] 汤智钧. 基坑开挖对紧邻地铁车站附属结构影响的模拟分析[J]. 四川水泥, 2022(10): 118-120, 123.
- TANG Zhijun. Simulation analysis of the influence of foundation pit excavation on the ancillary structure adjacent to subway station [J]. Sichuan Cement, 2022(10): 118-120, 123.
- [13] 郭康. 土岩组合地层地铁车站深基坑开挖变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.003243.
- GUO Kang. Research on excavation deformation of deep foundation pit of metro station in soil-rock dualistic stratum[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [14] 曾力, 杨景辉, 李明宇, 等. 土岩组合地层基坑开挖对下卧隧道变形影响模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 879-887.
- ZENG Li, YANG Jinghui, LI Mingyu, et al. Numerical analysis of influence of foundation pit excavation on deformation of underlying tunnel in soil-rock combination stratum [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(5): 879-887.
- [15] 李毅, 程宝平, 何学春, 等. 渭天河渠道土质边坡失稳分析与对策研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1):53-63. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.007.
- LI Yi, CHENG Baoping, HE Xuechun, et al. Instability analysis and countermeasure research of soil slope in Centianhe canal [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 53-63. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.007.
- [16] 李连祥, 张永磊, 扈学波. 基于PLAXIS 3D有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(Sup 1):254-261, 266.
- LI Lianxiang, ZHANG Yonglei, HU Xuebo. Finite element analysis of a pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Sup 1):254-261, 266.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:郭一鹏)