

文章编号: 1005-0523(2021)06-0001-10



## 风井深基坑开挖对抗角外浅基础建筑物的影响

丁士龙<sup>1</sup>, 孙志浩<sup>2,3</sup>, 张恒志<sup>2,3</sup>, 窦炳珺<sup>1</sup>, 郑凯达<sup>1</sup>, 徐长节<sup>2,3,4,5</sup>

(1. 浙江省大成建设集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 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; 5. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:**以杭州市某风井深基坑工程为研究对象,基于小应变土体本构模型和霍克-布朗岩石本构模型,建立了基坑开挖三维数值模型。通过与实测数据对比,验证了模型的有效性。在此模型基础上,对抗角外浅基础建筑进行适当简化,研究了不同距离下浅基础建筑墙体沉降、倾斜、扭转以及基础水平位移的变化规律。研究结果表明:随着建筑物与基坑距离增大,其墙体不均匀沉降及倾斜值呈先增大后减小再反向增大的趋势,其墙体扭转程度呈先减小后增大再减小的趋势,其基础水平位移呈逐渐减小趋势,但当减小到一定程度,基础位移方向会发生改变。

**关键词:**基坑开挖;坑角效应;数值模拟;浅基础建筑物;墙体扭转

中图分类号:[U217];TB115 文献标志码:A

本文引用格式:丁士龙,孙志浩,张恒志,等.风井深基坑开挖对抗角外浅基础建筑物的影响[J].华东交通大学学报,2021,38(6):1-10.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20211210.003

## Influence of Deep Foundation Pit Excavation of Subway Wind Tunnel on Shallow Foundation Buildings Outside the Pit Corner

Ding Shilong<sup>1</sup>, Sun Zhihao<sup>2,3</sup>, Zhang Hengzhi<sup>2,3</sup>, Dou Bingjun<sup>1</sup>, Zheng Kaida<sup>1</sup>, Xu Changjie<sup>2,3,4,5</sup>

(1. Zhejiang Dacheng Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
4. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 5. Jiangxi Engineering Research & Development Centre for Underground Technology, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:**Based on the deep foundation pit construction of subway wind tunnel in Hangzhou, a three-dimensional numerical model of foundation pit excavation was established based on the constitutive model of small strain soil and the constitutive model of Hawke-Brown Rock. The validity of the model was verified by comparing with the measured data. On the basis of this model, the shallow foundation building outside the corner of the pit was simplified, and the variation laws of wall settlement, inclination, torsion and foundation horizontal displacement of shallow foundation buildings at different distances were studied. The results indicate the following conclusions: with the increase of the distance between the building and the foundation pit, the uneven settlement and inclination of the wall first increase and then decrease and then increase reversely. The torsional degree of the wall first decreases and then increases and then decreases. The horizontal displacement of the foundation de-

收稿日期:2021-07-15

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(51725802);国家自然科学基金项目(51878276);国家自然科学基金-高铁联合基金项目(U1934208);浙江省自然科学基金委员会-华东院联合基金项目(LHZ19E080001);江西省自然科学基金重点项目(20192ACB20001)

creases gradually, but when it decreases to a certain extent, the direction of the foundation displacement will change.

**Key words:** foundation pit excavation; corner effect; numerical simulation; shallow foundation building; wall torsion

**Citation format:** DING S L, SUN Z H, ZHANG H Z, et al. Influence of deep foundation pit excavation of subway wind tunnel on shallow foundation buildings outside the pit corner[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 1-10.

基坑开挖会引起周围土层沉降<sup>[1-3]</sup>,进一步引发周围建筑沉降<sup>[4-5]</sup>。基坑开挖引起的地表沉降曲线形式一般为凹槽型或三角形,这两种形式的地表沉降均会造成周围建筑的不均匀沉降进而造成建筑物墙体产生裂缝甚至破坏。目前已有不少学者对基坑开挖引起周围建筑物的影响进行了研究。

在理论解析方面,木林隆等<sup>[6]</sup>利用考虑土体小应变特性的简化计算方法计算了基坑开挖引起的土体位移场,再结合被动桩两阶段分析法,提出了一种计算基坑开挖对邻近桩基础影响的简化分析方法;赵延林<sup>[7]</sup>应用弹塑性大变形理论研究了桩锚支护基坑开挖引起的邻近建筑物不均匀沉降,并提出了基坑开挖存在一个临界深度,当开挖超过临界深度时,建筑物的不均匀沉降变化率会急剧增加。在监测数据分析方面,刘念武等<sup>[8-9]</sup>根据监测数据详细分析了基坑开挖对浅基础建筑及桩基础建筑沉降的影响;孟宪国等<sup>[10]</sup>利用 Verhulst 分析方法预测了地铁端头井基坑开挖引起的地表沉降,并与实测数据进行了对比,证明了该方法预测地表沉降的有效性;王池<sup>[11]</sup>结合上海某风井基坑地表沉降监测值,对不同地表沉降预测模型进行了对比分析,并比选出了精度最高的地表预测模型;Cheng 等<sup>[12]</sup>根据实测数据分析了某逆作法基坑开挖对周边多个既有建筑物的影响,并认为建筑物基础形式、尺寸及与基坑的距离都会影响邻近基坑建筑物的变形。在数值模拟方面,高丙丽等<sup>[13]</sup>和崔铁军等<sup>[14]</sup>利用 FLAC 有限差分软件对盾构工作井基坑开挖引起的周边土体及管线变形规律进行了研究;章润红等<sup>[15-16]</sup>利用 PLAXIS 2D 软件对基坑开挖卸载作用下临近地铁结构附加弯矩、位移响应和临近边坡安全性、位移响应进行了研究;芦友明<sup>[17]</sup>和刘睿<sup>[18]</sup>利用 ABAQUS 有限元分析软件对基坑开挖引起邻近建筑物的变形规律进行了详细的分析,并综合考虑了基坑与建

筑物距离及基坑支护形式等因素的影响;为精细化分析建筑物与基坑间空间位置差异对建筑物变形产生的影响,郑刚等<sup>[19]</sup>利用有限元软件 PLAXIS 分析了建筑物与基坑边成不同距离及角度时建筑物的变形性状。

以往的研究主要基于平面应变状态下基坑开挖对临近建筑物影响,或者仅考虑三维条件下基坑开挖对非坑角区域建筑物的影响。因存在坑角效应,即坑角处支护结构的受力变形较小,学者较少对该区域建筑物的响应进行研究。但实际工程监测中发现,当基坑开挖较深时,对坑角外建筑物(图 1)也会产生较大影响。为了研究坑角外建筑物对深基坑开挖的响应问题,以杭州市某地铁风井深基坑为研究对象,采用有限元软件 PLAXIS 3D 对风井基坑及周边浅基础建筑进行了三维数值模拟。通过数值模拟结果与现场监测数据对比验证模型的有效性。在此模型基础上,对浅基础建筑物形状进行了简化,并通过改变浅基础建筑与坑角距离,研究了不同距离下坑角外建筑物墙体沉降、倾斜、扭转和基础水平位移的变化规律。得出的结论可为类似工程监测方案的制定提供参考。

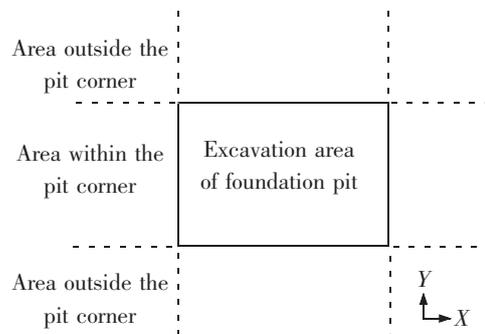


图 1 坑角外区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the area outside the corner of the foundation pit

### 1 工程概况

某城际铁路中间风井基坑位于浙江省杭州市。风井基坑开挖深度为 27 m,采用咬合桩加 3 道内支撑的支护形式,咬合桩桩径为 1.0 m,桩间距为 0.8 m,桩长为 30 m。第 1、3 道支撑为钢筋混凝土支撑,第 2 道支撑为钢支撑,基坑支护结构剖面示意图如图 2 所示。4 道支撑分别设置于-1.05,-8.05,-15.05,23.00 m 处,基坑支撑平面布置图如图 3 所示,其中钢支撑安装时施加 990 kN 的预加轴力。风井基坑周围有多幢砖混结构建筑(均为浅基础),南侧紧邻河道,风井基坑平面位置示意图如图 4 所示。该场地土层上软下硬,上部为素填土层,下部为卵石层和岩石层。现场岩土层的基本物理力学参数见表 1。

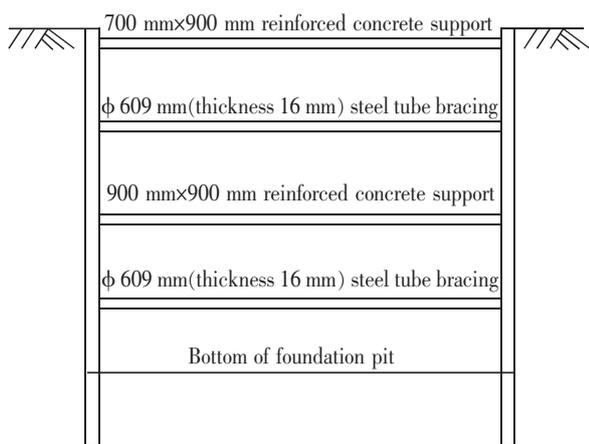
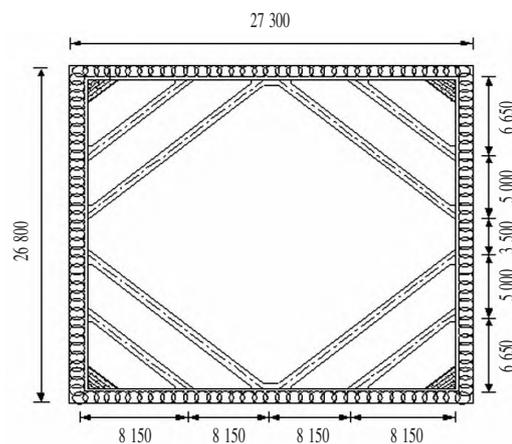
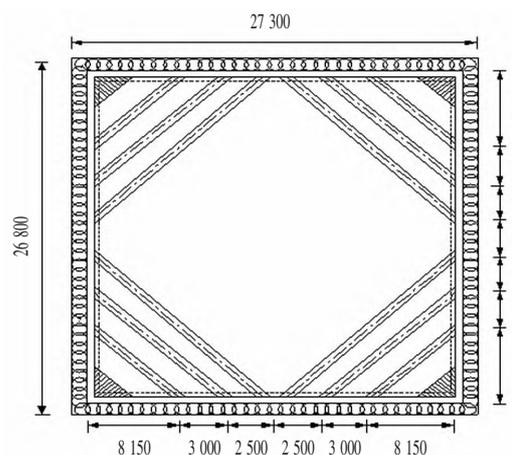


图 2 基坑支护结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of foundation pit support structure



(a) The first and third reinforced concrete support layout



(b) The second and fourth steel support layout

图 3 基坑支撑布置图(单位:mm)

Fig.3 Layout of foundation pit support(Unit:mm)

表 1 现场岩土层的基本物理力学参数

Tab.1 Basic physical and mechanical parameters of field rock and soil layers

Layer	Soil and rocks	Average thickness/m	$\gamma/$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$c'/$ kPa	$\varphi'/$ ( $^\circ$ )	$E_{\text{sl-2}} /$ MPa
①	Plain fill	1.6	19.5	3	15	3
②	Pebble	4.4	20.7	2	35	20
③	Fully weathered siltstone	1.0	18.1	36	16	6
④	Strongly weathered siltstone	1.2	20.3	23	25	15
⑤	Medium weathered siltstone	10.1	24.5	400	40	300
⑥	Medium weathered tuff	10.7	25.0	850	43	1 000
⑦	Medium weathered siltstone	-	24.5	400	40	300

Note: $\gamma$  is the soil weight; $c'$  is the effective cohesion; $\varphi'$  is the effective internal friction angle; $E_{\text{sl-2}}$  is the compression modulus.

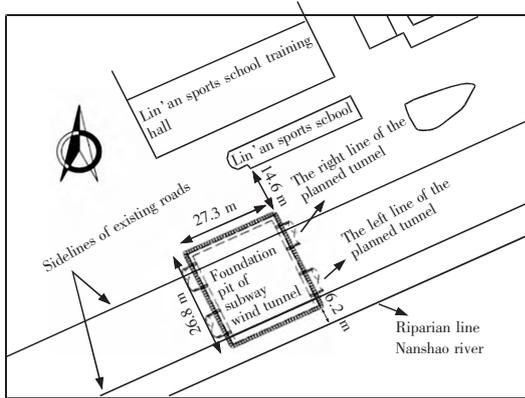


图4 风井基坑平面位置图

Fig.4 Plan view of foundation pit of subway wind tunnel

## 2 模型建立及有效性验证

### 2.1 模型建立

使用有限元软件 PLAXIS 3D 对上述基坑及周围建筑进行模拟。土体和全(强)风化岩采用小应变土体硬化模型(hardening soil model with small-strain stiffness, HSS 模型),该模型能适用于多种土类(软土和较硬土层)的破坏和变形行为的描述。中外已有许多学者<sup>[15,20-22]</sup>使用 HSS 模型来模拟基坑开挖时的土体变形,其模拟结果与实测结果具有很好的一致性。

HSS 模型是土体硬化模型(hardening soil model, HS 模型)的一个改进,两者均可以描述土体的剪切硬化和体积硬化行为,其区别在于小应变条件下刚度值的选用。HS 模型假设土体在卸载和重加载时的剪切刚度是定值,但实际上随着土体应变的增大,土体的剪切刚度  $G$  会呈非线性衰减(图 5)。HSS 模型通过增加两个参数  $G_0, \gamma_{0.7}$  来模拟土体的这种特性,其中  $G_0$  为土体在应变很小时的剪切模量,  $\gamma_{0.7}$  为割线剪切模量退化为  $0.7G_0$  时的剪切应变。

中风化岩层与土体在性质上有较大差异,用一般土体的本构模型进行模拟较难得到合理结果,故本文采用可以描述岩石强度与变形行为的霍克-布朗模型进行模拟。霍克-布朗模型所采用的破坏准则是一种非线性强度近似准则,在其连续方程中不仅包含剪切强度,也包含拉伸强度<sup>[23]</sup>。该破坏准则可以用最大主应力和最小主应力关系来描述

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \left( m_b \frac{-\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力;  $m_b$  是对完整岩石参数  $m_i$  的折减;  $\sigma_{ci}$  为完整岩石的单轴抗

压强度;  $s$  和  $\alpha$  均为岩块的辅助材料参数。

各岩土层的参数取值见表 1 和表 2, 岩土层参数主要由地勘报告获得, 地勘报告中未给出的参数根据相关文献<sup>[23-24]</sup>和参数反分析获得。根据文献<sup>[24]</sup>, 关于小应变本构模型各参数的经验取值方法如表 3 所示。使用板单元模拟咬合桩, 界面单元模拟桩土相互作用(界面单元强度  $R_{inter}$  取 0.9,  $R_{inter}$  定义见文献<sup>[23]</sup>), 梁单元模拟内支撑和围檩, 板单元模拟周边建筑物的墙体、楼板和基础, 使用面荷载模拟坑边施工荷载, 面荷载根据实际工况取 30 kPa。各结构计算参数见表 4, 有限元模型如图 6 所示, 有限元网格划分如图 7 所示。

为考虑建模的尺寸效应, 进行了模型尺寸试算, 最终确定  $X$  和  $Y$  方向计算宽度自开挖边界向外取开挖深度的 5 倍,  $Z$  方向计算宽度自开挖边界向外取开挖深度的 4 倍。模型边界设置为标准边界, 即侧边约束水平向位移, 竖向位移自由, 底边同时约束水平和竖向位移, 顶面无约束。

模型严格模拟实际施工工况, 基坑开挖的具体实现步骤为: ① 建立整个场地土体、建筑物及支护结构模型; ② 初始地应力的平衡, 建立初始应力场, 激活建筑物, 同时支护结构的刚度消失, 即支护结构单元失去活性, 使土体自重沉降过程中支护结构对土体自重沉降无影响; ③ 初始应力场引起的位移值清零, 激活支护结构板单元, 激活坑边荷载; ④ 降水至基坑开挖面以下 1 m, 分层挖土并激活相应支撑(若为钢支撑则同时激活预应力), 降水是通过使土体变为干实现的, 土体开挖是通过逐层使土体单元失去活性实现的<sup>[22]</sup>。主要开挖工况如表 5 所示。

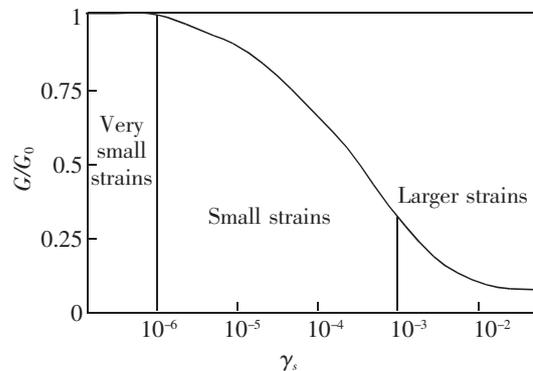


图5 土体的剪切刚度-应变曲线

Fig.5 Shear modulus-strain curve of soil

表 2 模型中岩土层的物理力学参数  
**Tab.2 Physical and mechanical parameters of the rock and soil layer in the model**

Layer	Soil and rocks	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$
①	Plain fill	3.78	3.15	22.05	2	88.20
②	Pebble	20	20	80	2	400
③	Fully weathered siltstone	6	6	24	2	120
④	Strongly weathered siltstone	15	15	60	2	300

Layer	Soil and rocks	$E/\text{MPa}$	$GSI$	$m_i$	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$
⑤	Medium weathered siltstone	300	0.25	9	19.6
⑥	Medium weathered tuff	1 000	0.19	15	43.4
⑦	Medium weathered siltstone	300	0.25	9	19.6

Note:  $E_{50}^{\text{ref}}$  is the reference secant modulus of the triaxial consolidation drained shear test;  $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$  is the reference tangent modulus of the consolidation test;  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  is the reference unloading and reloading modulus of the triaxial consolidation drainage unloading and reloading test;  $\gamma_{0.7}$  is the corresponding shear strain when the secant shear modulus  $G_{\text{secant}}$  attenuates 0.7 times of the initial shear modulus  $G_0$ ;  $G_0^{\text{ref}}$  is the reference initial shear modulus for the small strain stiffness test;  $E$  is the elastic modulus of the rock;  $GSI$  is the geological strength parameter;  $m_i$  is the complete rock parameter;  $\sigma_{ci}$  is the uniaxial compressive strength of the intact rock.

表 3 HSS 模型参数  
**Tab.3 HSS model parameters**

Soil	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$
Cohesive soil	$0.9E_{S1-2}^{\text{ref}}$	$1.2E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	$7E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	$(3.5\sim 5.0)E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	1.5~2.8
Sandy soil	$E_{S1-2}$	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	$4E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	$5.0E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	0.6~3.0

表 4 结构计算参数  
**Tab.4 Calculation parameters of structure**

Structure	Simulation element	Thickness/m	Gravity/( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	Elastic modulus/MPa	Poisson ratio
Retaining pile	Plate	0.92	25.0	30 000	0.2
Reinforced concrete support	Anchor	-	25.0	30 000	0.2
Steel bracing	Anchor	-	78.5	206 000	0.15
Purlin	Anchor	-	25.0	30 000	0.2
Building external wall	Plate	0.37	18.5	30 000	0.2
Building interior wall	Plate	0.24	18.5	30 000	0.2
Building floor	Plate	0.30	25.0	30 000	0.2
Building foundation	Plate	0.30	25.0	30 000	0.2

表5 开挖阶段工况

Tab.5 Working conditions at the excavation stage

Working condition	Construction stage of foundation pit
1	Precipitation in the pit to -2.5 m. Excavate the first layer of soil to -1.5 m.
2	The first support was constructed, and the pit was dewatered to -9.5 m. Excavate the second layer of soil to -8.5 m.
3	The second support was constructed, and the pit was dewatered to -16.5 m. Excavate the third layer of soil to -15.5 m.
4	The third support was constructed, and the pit was dewatered to -24 m. Excavate the fourth layer of soil to -23 m.
5	The fourth support was constructed, and the pit was dewatered to -28 m. Excavate the fifth layer of soil to -27 m.

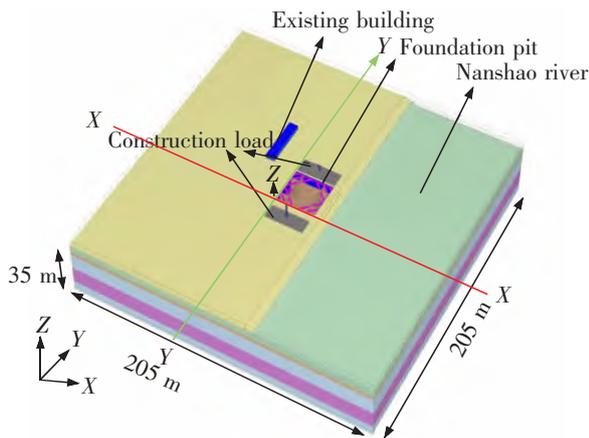


图6 有限元模型

Fig.6 Finite element model

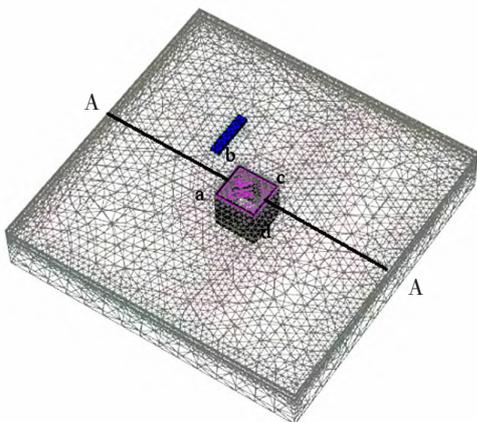


图7 数值分析模型网格图

Fig.7 Mesh of model for numerical simulation

## 2.2 模型计算结果与实测结果对比

选取剖面 A-A(图7)与基坑 ab 边交点处围护桩为研究对象,分别绘制出开挖至坑底时该处围护桩水平位移计算值与实测值随深度变化的曲线。如图8所示,围护桩水平位移计算值与实测值变化趋势一致,随桩深增加均呈现出先增大后减小,然后缓慢增大再减小的趋势,且均在桩深为 10 m 左右时达到最大值。由于开挖采用自上而下的方式,支撑架设及时,支护桩最大水平位移并没有出现在最终开挖标高附近<sup>[25]</sup>。

围护桩水平位移实测最大值为 16.79 mm,模拟最大值为 14.85 mm。深度 0 m 处模拟值大于实测值,主要原因是实际工程中对基坑周边地表进行了硬化,硬化路面与第一道支撑的冠梁部分刚接从而抑制了桩顶的位移。深度 10 m 处模拟值小于实测值,主要原因在于实际工程中的坑边荷载较为复杂,而模拟过程中仅采用了均布面荷载来模拟,导致不能完全反映坑边荷载对支护结构位移的影响。除此之外,土的各向异性对开挖分析有一定影响,但 HSS 模型不能考虑这种特性,这也是产生误差的原因之一<sup>[26]</sup>。总体来说模拟曲线与实测曲线较为吻合,证明本文的有限元模型参数选取合理,可用于后续研究。

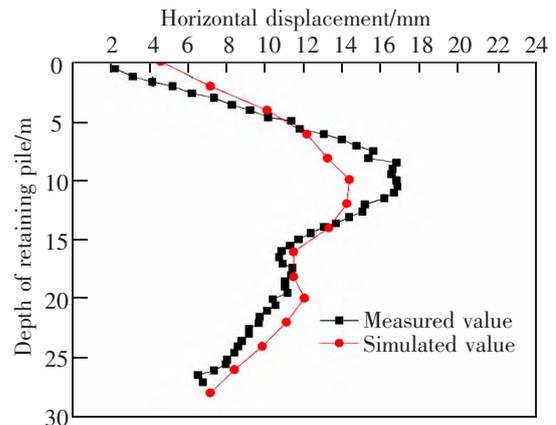


图8 支护桩水平位移计算值与实测值对比

Fig.8 Comparison of calculated horizontal displacement of supporting pile with measured value

## 3 参数分析

为研究坑角外建筑物与坑角距离对建筑物墙体和基础的影响,在上述模型的基础上,改变建筑物与基坑的距离,设置了建筑物与基坑角部净距分别为  $0.2h$ ,  $0.5h$ ,  $1.0h$ ,  $2.0h$  ( $h$  为基坑开挖深度)共 4

组模型,如图 9 所示。为了使分析结果更具有普遍意义,对坑边建筑物进行了适当的简化,将长条形的浅基础建筑调整为等面积的正方形建筑,并设置建筑物位于坑角 45°方向,如图 9 所示。

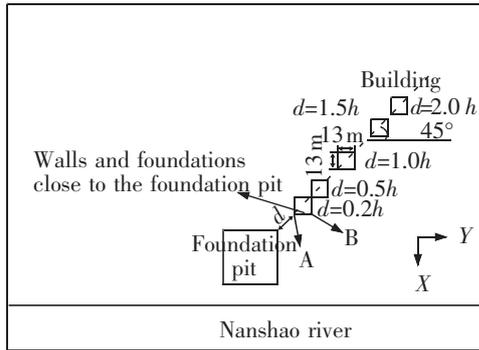


图 9 建筑物距基坑不同距离示意图

Fig.9 Diagram of different distance between building and foundation pit

### 3.1 临近建筑物墙体沉降分析

提取不同距离下临近建筑物靠近基坑侧墙体(图 9)沉降值,如图 10 所示。

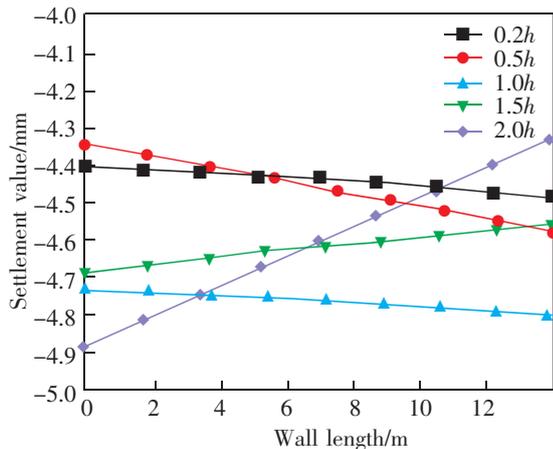


图 10 不同距离下临近建筑物墙体(靠近基坑侧)沉降

Fig.10 Settlement of wall near building (near foundation pit) at different distance

由图 10 可知,当临近建筑物与基坑距离逐渐增大时,其墙体最大沉降值呈先增大后减小的趋势。主要原因在于基坑开挖时,产生的坑外地表沉降曲线为凹槽形,其上建筑物也会产生与地表沉降相同的沉降趋势。当建筑物与坑边较近时,建筑物墙体左侧沉降小,右侧沉降大,而当建筑物与坑边较远时,建筑物墙体左侧沉降大,右侧沉降小。

表 6 为不同距离下临近建筑物墙体的最大差异沉降值。由表 6 可知,建筑物的墙体差异沉降随

其与基坑距离的增大呈先增大后减小再反向增大的趋势。当距离为 1.5h 时,最大差异沉降值为 -0.13 mm,表明此时墙体靠近基坑侧沉降大,远离基坑侧沉降小。

表 6 不同距离下临近建筑物墙体最大差异沉降  
Tab.6 Maximum differential settlement of walls of adjacent buildings at different distance

Distance from edge of pit	0.2h	0.5h	1.0h	1.5h	2.0h
Maximum differential settlement value/mm	0.082	0.23	0.065	-0.13	-0.56

### 3.2 临近建筑物墙体水平倾斜分析

提取不同距离下坑角外建筑物靠近基坑侧墙体位置 A 处水平位移值(图 9),如图 11 所示。建筑物距离基坑较近时,墙体向远离基坑方向倾斜,而当建筑物离坑边超过一定距离后,墙体向基坑方向倾斜。该结果表明,受基坑开挖形成的沉降槽影响,与坑角距离较近处建筑物有“后仰”变形趋势,而与坑角距离较远处建筑物有“前倾”变形趋势。

定义墙体整体倾斜为墙体倾斜方向两端点的水平方向位移差与墙体高度的比值,表 7 为不同距离下临近建筑物墙体整体倾斜对比。由表 7 可知,随着建筑物离基坑距离的增大,建筑物的倾斜呈现先增大后减小的趋势,最后会出现反向倾斜,建筑物墙体倾斜与墙体的差异沉降变化趋势是一致的。

提取不同距离下坑角外建筑物靠近基坑侧墙体位置 B 处水平位移值,如图 12 所示。由图 12 可知,受 Y 方向地表沉降变化影响,位置 B 处的墙体

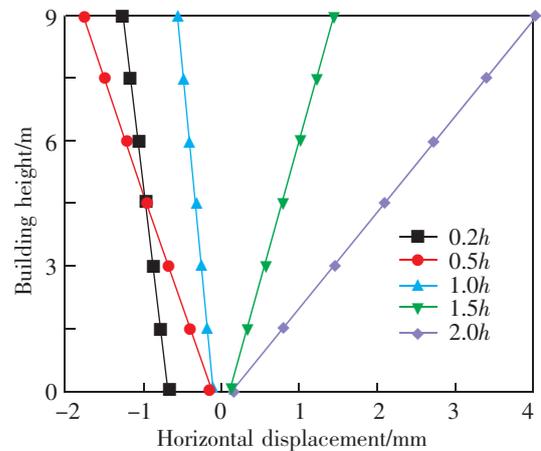


图 11 不同距离下临近建筑物墙体(A点)倾斜

Fig.11 Inclination of wall (point A) of adjacent buildings at different distance

水平位移值与A处存在一定差异,这将造成临近基坑侧墙体发生扭转变形。定义扭转程度= $A$ 处墙体整体倾斜- $B$ 处墙体整体倾斜/ $A$ 处墙体整体倾斜,绝对值越大则墙体的扭转程度越大,不同距离下临近建筑物的墙体扭转程度如表8所示。从表8中可以看出,随着建筑物与坑边距离的增大,建筑物墙体的扭转程度呈先减小后增大再减小的趋势。三维空间条件下,建筑物受基坑开挖产生的墙体扭转程度变化趋势较为复杂,主要原因在于建筑物墙体倾斜同时受到 $X, Y$ 两个方向开挖卸荷引起的地表沉降影响。

表7 不同距离下临近建筑物墙体整体倾斜对比

Tab.7 Overall inclination comparison of walls of adjacent buildings at different distance

Distance from edge of pit	0.2h	0.5h	1.0h	1.5h	2.0h
Overall inclination/ $(\times 10^{-5})$	6.4	17.9	5	14.5	42.8

表8 不同距离下临近建筑物墙体扭转程度对比

Tab.8 Torsion degree comparison of walls of adjacent buildings at different distance

Distance from edge of pit	0.2h	0.5h	1.0h	1.5h	2.0h
Torsion degree/ $(\times 10^{-2})$	6.7	1.1	6.8	2.75	1.6

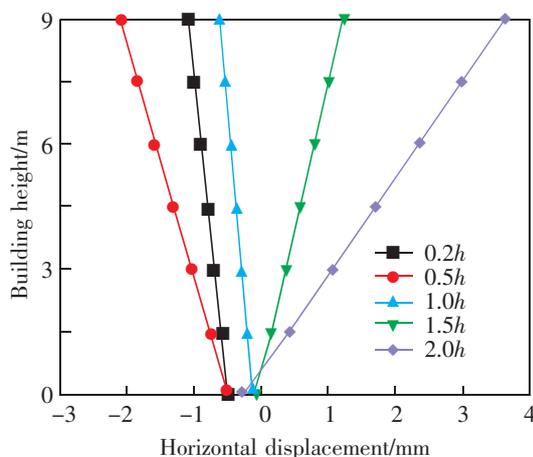


图12 不同距离下临近建筑物墙体(B点)倾斜

Fig.12 Inclination of wall (point B) of adjacent buildings at different distance

### 3.3 临近建筑物基础水平方向位移对比

提取不同距离下建筑物靠近基坑侧基础水平方向位移值( $XY$ 平面内位移),如图13所示。

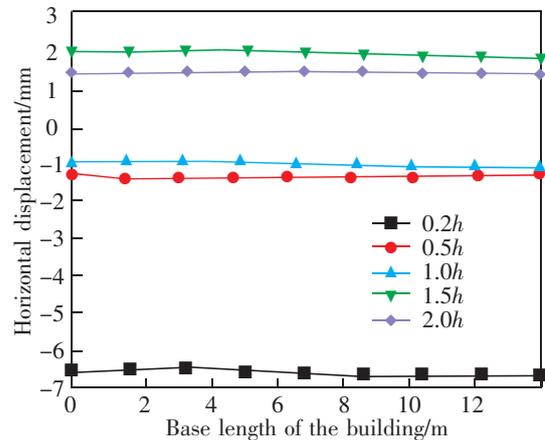


图13 不同距离下临近建筑物基础水平方向位移

Fig.13 Horizontal displacement of foundation of adjacent buildings at different distance

由图13可知,基坑开挖会引起临近建筑物基础向基坑反方向位移,但随着建筑物与基坑距离的增大,建筑物基础的水平位移呈逐渐减小趋势,但当距离增大到 $1.5h$ 时,建筑物基础开始朝向基坑侧位移。如3.2节分析,当建筑物与坑角距离较近时,建筑物将发生“后仰”的变形趋势,此时建筑物基础也将发生远离基坑侧的位移;而当建筑物与坑角距离较远时,建筑物将发生“前倾”的变形趋势,此时建筑物基础会发生向基坑侧靠近的位移。

由图13可知,墙体的水平位移曲线沿建筑物基础长度方向基本没有变化,即沿 $X$ 方向建筑物基础的水平位移变化较小,主要原因在于基础的刚度较大导致其呈整体位移形式。

## 4 结论

采用三维数值模拟方法,研究了风井深基坑开挖对坑角外临近浅基础建筑物的影响,主要得出以下结论:

1) 建筑物与基坑距离较近时,墙体沉降呈临近基坑侧小,远离基坑侧大的趋势,但当建筑物与基坑超过一定距离(本算例约为 $1.5h$ ),墙体沉降会呈相反趋势。墙体不均匀沉降呈先增大后减小再反向增大趋势。

2) 建筑物与基坑距离较近时,建筑物墙体向基坑外倾斜,但当距离增大到一定值时(本算例为 $1.5h$ ),建筑物墙体向基坑内倾斜,墙体倾斜值亦呈

先增大后减小再反向增大的趋势。

3) 因基坑开挖导致的坑角外建筑物墙体两端倾斜程度不一致,墙体会产生扭转变形。随着建筑物与坑边距离的增大,建筑物墙体的扭转程度呈先减小后增大再减小的趋势。

4) 建筑物与基坑距离较近时,建筑物基础向远离基坑侧水平位移,随着建筑物与基坑距离的增大,建筑物基础的水平位移将逐渐减小,最终会发生向基坑方向靠近的位移。

#### 参考文献:

- [1] 万先逵,袁聪聪,黄展军,等. 某深厚软土地层基坑支护方案优化研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):47-52.  
WAN X K, YUAN C C, HUANG Z J, et al. Study on optimization of foundation pit support scheme in deep soft soil [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 47-52.
- [2] 王凌,张声宇,张跃明,等. 南昌河流阶地内地铁车站基坑变形研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(3):31-40.  
WANG L, ZHANG S Y, ZHANG Y M, et al. Study on deformation of deep excavation for metro stations in river terraces in Nanchang[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 38(3): 31-40.
- [3] ZENG C F, XUE X L, ZHENG G, et al. Responses of retaining wall and surrounding ground to pre-excitation dewatering in an alternated multi-aquifer-aquitard system[J]. Journal of Hydrology, 2018, 519: 609-626.
- [4] TAN Y, JIANG W Z, LUO W J, et al. Longitudinal sliding event during excavation of Feng-Qi station of Hangzhou Metro line 1; Postfailure investigation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(4): 04018039.
- [5] 曾晓鑫,丁文湘,彭玲,等. 隔离桩间距对基坑开挖引起地铁隧道的位移影响分析[J]. 中国科技论文,2018,13(1):17-22.  
ZENG X X, DING W X, PENG L, et al. Effects of pile spacing on the displacement of subway tunnel during excavation[J]. China Science Paper, 2018, 13(1): 17-22.
- [6] 木林隆,黄茂松. 基于小应变特性的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):304-310.  
MU L L, HUANG M S. Small-strain behavior-based method for effect of excavations on adjacent pile foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 304-310.
- [7] 赵延林. 基坑周边建筑物不均匀沉降变形的模拟分析[J]. 黑龙江科技学院学报,2007,17(1):45-47.  
ZHAO Y L. Numerical analysis of differential sedimentation deformation of building around foundation pit[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2007, 17(1): 45-47.
- [8] 刘念武,龚晓南,俞峰,等. 软土地区基坑开挖引起的浅基础建筑沉降分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):325-329.  
LIU N W, GONG X N, YU F, et al. Settlement of buildings with shallow foundations induced by excavation in soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 325-329.
- [9] 刘念武,陈奕天,龚晓南,等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学,2019,40(4):1515-1525.  
LIU N W, CHEN Y T, GONG X N, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1525.
- [10] 孟宪国,马佳,曾宪坤. 地铁车站端头盾构井深基坑地表沉降分析与预测[J]. 路基工程,2019(5):82-88.  
MENG X G, MA J, ZENG X K. Analysis and prediction of surface settlement around deep foundation pit of shield shaft at the end of metro station[J]. Subgrade Engineering, 2019(5): 82-88.
- [11] 王池. 地铁风井基坑地表沉降预测模型及分析研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.  
WANG C. Prediction model and analysis of ground surface settlement in foundation pit of subway wind tunnel[D]. Huai'nan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [12] CHENG W L, LIAO J T, OU C Y. Building response and ground movements induced by a deep excavation[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 209-220.
- [13] 高丙丽,任建喜. 盾构始发井施工对周围管线的变形影响规律及其控制技术[J]. 现代隧道技术,2014,51(3):193-199.  
GAO B L, REN J X. Influence of launching shaft construction on surrounding pipeline deformation and a control technique[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 193-199.
- [14] 崔铁军,马云东. 盾构接收井施工仿真及地表沉降数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S2):645-650.  
CUI T J, MA Y D. Simulation of shield receiving shaft construction and numerical analysis of surface settlement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 645-650.
- [15] 章润红,刘汉龙,仇文岗. 深基坑支护开挖对临近地铁隧道结构的影响分析研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38

- (5):857-866.
- ZHANG R H,LIU H L,ZHANG W G. Numerical investigation on tunnel responses induced by adjacent deep braced pit excavations[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2018,38(5):857-866.
- [16] ZHANG R H,ZHANG W G,HOU Z J,et al. Reliability assessment on deep braced excavations adjacent to high slopes in mountain cities[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA,2021,52(1):19-25.
- [17] 芦友明. 深基坑开挖对邻近建筑物基础的影响研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2013.
- LU Y M. Influence of deep foundation pit excavation on neighboring buildings foundation[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University,2013.
- [18] 刘睿. 基坑开挖引起的变形及对邻近建筑物的影响[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- LIU R. The deformation caused by excavation and the influence on adjacent building[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2015.
- [19] 郑刚,李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(4):615-624.
- ZHENG G,LI Z W. Finite element analysis of response of buildings with arbitrary angle adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(4):615-624.
- [20] ZHANG W G,GOH A,XUAN F. A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays[J]. Computers and Geotechnics,2015,63:67-72.
- [21] GOH A,ZHANG F,ZHANG W G,et al. A simple estimation model for 3D braced excavation wall deflection[J]. Computers and Geotechnics,2017,83:106-113.
- [22] 陈江,孙志浩,徐长节. 软土地区深大基坑支护方案优化三维数值模拟分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(31):319-326.
- CHEN J,SUN Z H,XU C J. Three-dimensional numerical simulation analysis of optimization of deep and large foundation pit support scheme in soft clay area[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(31):319-326.
- [23] 刘志祥,张海清. PLAXIS 高级应用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- LIU Z X,ZHANG H Q. PLAXIS Advanced Application Tutorial[M]. Beijing:China Machine Press,2015.
- [24] 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 W D,WANG H R,XU Z H. 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.
- [25] LI Y Q,ZHANG W G,ZHANG R H. Numerical investigation on performance of braced excavation considering soil stress-induced anisotropy[J]. Acta Geotechnica,2021,5:1-13.
- [26] ZHANG R,WU C,GOH A,et al. Estimation of diaphragm wall deflections for deep braced excavation in anisotropic clays using ensemble learning[J]. Geoscience Frontiers,2020,12:365-373.



第一作者:丁士龙(1970—),男,高级工程师,研究方向为基坑工程,隧道工程。E-mail:980365037@qq.com。



通信作者:徐长节(1972—),男,教授,博士,教育部“长江学者”特聘教授,国家自然科学基金委杰出青年基金获得者,研究方向为土动力学,基坑工程及隧道工程等。E-mail:xcj@zju.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕 刘棉玲)