

引用本文:吴瑞拓,顾晓强,高广运,等. 基于 HSS 模型的上海地铁深基坑开挖变形分析[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):64-70.
WU Rui-tuo, GU Xiao-qiang, GAO Guang-yun, et al. Analysis of Deep Excavation Deformation of Shanghai Metro Station Using HSS Model [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 64-70.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08055

基于 HSS 模型的上海地铁深基坑开挖变形分析

吴瑞拓^{1,2}, 顾晓强^{1,2}, 高广运^{1,2}, 樊 烽³, 张 科³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 浙江祥生建设工程有限公司, 浙江 诸暨 311800)

摘要:为研究上海软土地地区地铁深基坑开挖的变形性状,选取上海地区一典型软土地地铁深基坑,基于土体小应变硬化模型(HSS 模型)和相应的模型参数,采用 PLAXIS 3D 软件对该基坑的开挖过程进行了三维有限元数值模拟,并结合现场监测的数据对基坑围护结构的侧移和坑外地表沉降进行了对比。结果表明:使用 HSS 模型和合适的模型参数可以有效地模拟基坑开挖过程中的变形性状,实测结果与有限元分析结果相吻合,具有很好的工程实用价值;该上海地铁深基坑的最大地表沉降与围护结构最大侧移间的关系符合上海地区最大地表沉降与围护结构最大侧移间的统计关系;围护结构的最大侧移深度发生在基坑的开挖面处;长窄型地铁深基坑仍存在较明显的空间效应,基坑长边中部的变形大于基坑角部,在长窄型基坑的设计和施工中应采取针对性措施。

关键词:基坑工程;变形分析;三维数值模拟;HSS 模型

中图分类号: TU437.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)06-0064-07

Analysis of Deep Excavation Deformation of Shanghai Metro Station Using HSS Model

WU Rui-tuo^{1,2}, GU Xiao-qiang^{1,2}, GAO Guang-yun^{1,2}, FAN Feng³, ZHANG Ke³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Zhejiang Xiangsheng Construction Engineering Co., Ltd., Zhuji 311800, Zhejiang, China)

Abstract: To analyze the deformation of the metro station deep excavation in Shanghai, the excavation process of a typical metro station in soft soil area was numerically simulated by using PLAXIS 3D with the small strain hardening model (HSS model) of soil and appropriated model parameters. The horizontal displacements of retaining structure and the settlements of ground surface behind walls were compared through the field monitoring data. The results show that the deformation in the excavation can be effectively simulated by the HSS model with appropriate model parameters. The simulated results are consistent with the measured results, which has a good engineering practical value. The relationship between the maximum ground settlement and maximum horizontal displacement of the retaining structure agrees well with the measurement statistics in Shanghai. The maximum horizontal displacement of the retaining structure usually

收稿日期:2021-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52178344, 51822809)

作者简介:吴瑞拓(1997-),男,江西抚州人,工学硕士研究生, E-mail: wuruituo@tongji.edu.cn.

通信作者:顾晓强(1981-),男,浙江桐乡人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: guxiaoqiang@tongji.edu.cn.

occurs near the excavation surface. The long and narrow shape of the metro station deep excavation has an obvious space effect that the deformation near the middle span of pit is larger than that near the corner, which should be carefully considered in the design and construction of long and narrow metro station excavation.

Key words: excavation engineering; deformation analysis; three-dimensional numerical simulation; HSS model

0 引 言

随着城市的不断发展,地下空间的利用率逐步提升,基坑工程得到了大规模应用,基坑工程的设计和理论也逐步完善。基坑的开挖容易引起周边环境变形,这些变形会对复杂的城市地下环境造成极大影响,引起周边结构的开裂甚至破坏,从而影响结构的正常使用^[1],因此对基坑开挖引起的变形进行预测与控制至关重要。

大量工程监测数据表明,深基坑工程中的土体处于小应变状态^[2],而土体刚度在小应变条件下具有高度非线性^[3],因此在进行深基坑工程的变形分析时,有必要考虑土体在小应变条件下的刚度特性,采用能够考虑该特性的土体本构模型。

土体的本构模型是描述土体行为的一种有效手段。Schanz 等^[4]最早提出土体硬化模型(HS 模型),该模型考虑了土体的剪胀性以及基坑开挖过程中加卸载的影响,但是未能考虑土体的小应变刚度特性。Benz 等^[5-6]在土体硬化模型的基础上,将土体小应变阶段的刚度特性纳入其中,加入了 2 个小应变参数,包括剪切初始模量 G_0^{ref} 和剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$,提出了小应变硬化模型(HSS 模型),将土的小应变刚度特性纳入了岩土工程设计的基础。Schweiger 等^[7]利用基坑开挖有限元算例对比了 HS 模型、HSS 模型和摩尔-库仑模型,结果表明 HSS 模型能够更好地预测基坑变形。王卫东等^[8]通过室内试验确定 HS 模型参数,并依据反分析方法确定了土体的小应变参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 。李青等^[9]采用现场波速试验和室内弯曲元试验对上海地区典型黏土层的初始剪切模量进行了研究,给出了各土层的经验参数取值。梁发云等^[10]、张娇^[11]、顾晓强等^[12]、陆路通^[13]先后针对 HSS 模型参数进行了研究。谢东武等^[14]对上海典型土层进行了室内单元试验,并利用数值模拟方法进行了初始弹性模量 E_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$ 的敏感性分析。尹骥^[15]、陈少杰等^[16]使用有限元方法,结合 HSS 模型对上海地区深基坑进行了开挖数值模拟。顾晓强

等^[17]通过大量试验数据提供了整套上海土体 HSS 模型参数的合理取值方法,但用于模型验证的基坑工程采用二维有限元数值分析,没有体现地铁车站深基坑的空间效应。

本文针对上海地铁某长条形深基坑的开挖过程进行了三维有限元分析,采用了能够考虑土体小应变刚度特性的 HSS 模型,分析了基坑围护结构侧移变形和坑外地表沉降变形的三维空间效应,并与现场变形实测结果进行了对比,以期为软土地区地铁车站深基坑工程的变形分析和控制提供参考。

1 地铁深基坑场地概况

该地铁深基坑场地位于上海轨道交通 13 号线祁连山南路站,场地资料来源于 Tan 等^[18]。基坑宽约 26 m,长约 188 m,开挖深度为 17.5~26.2 m,由东西 2 个竖井、换乘竖井以及由竖井隔开的 2 个标准段组成。图 1 为基坑的平面和测点布置图。基坑的开挖顺序为:开挖东竖井和标准段 1,完成后开挖西竖井、换乘竖井和标准段 2。土体开挖完成后立即施工支撑,基坑中部的换乘竖井将基坑分隔成了 2 个独立的区段。本文针对基坑的标准段 1 进行研究。标准段 1 的开挖宽度为 20~22 m,长约 60 m,最终开挖深度为 17.5 m。场地土层分布见图 2,其中, r 为土体重度。该场地地下 32 m 范围内的土体为从软到硬的黏土和粉土,灵敏度为 2.0~6.0,地下 40.4 m 处的土体为中密~密实的砂土,砂土层下部为较为坚硬的粉质黏土,长期地下水位位于地表下 1 m。

2 基坑支护方案

基坑采用地下连续墙结合内支撑的方式进行支护。标准段 1 基坑采用 5 层内支撑,采用 800 mm 厚的地下连续墙进行围护,基坑的第 1 道内支撑为 800 mm×900 mm 的现浇钢筋混凝土支撑,其余内支撑均采用外径 609 mm、壁厚 16 mm 的钢管支撑。钢筋混凝土支撑的水平中心间距为 4~8 m,钢管支撑的水平中心间距为 2~3 m。上海地区地下水位

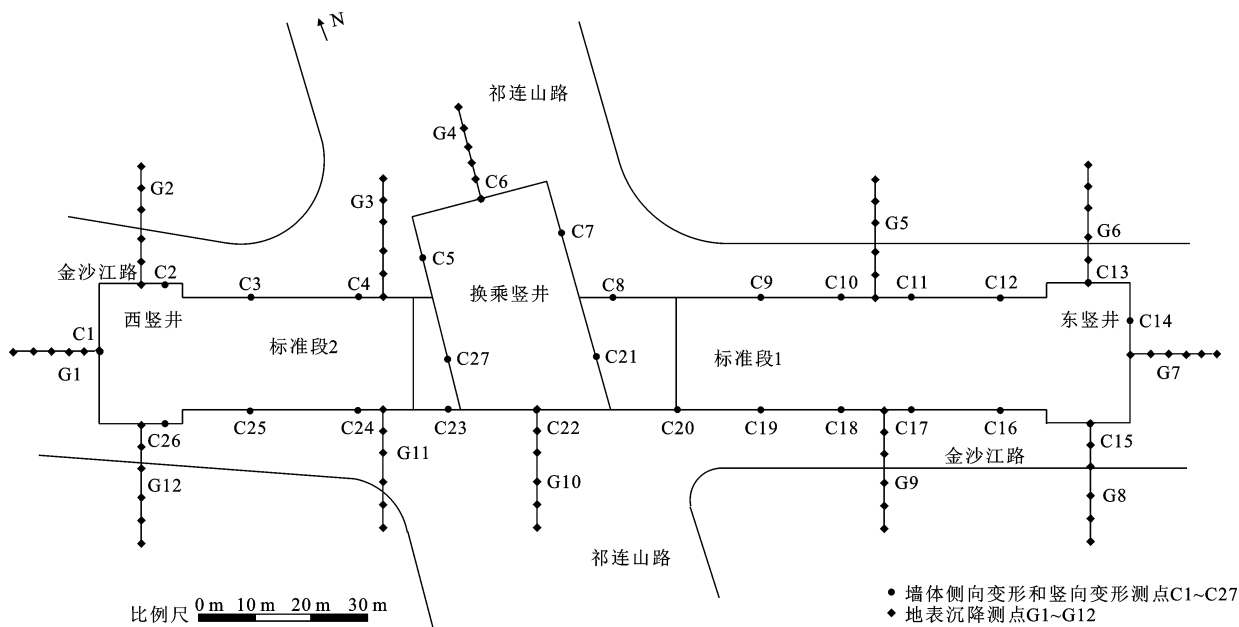


图 1 基坑平面和测点布置

Fig. 1 Foundation Pit Plane and Layout of Measuring Points

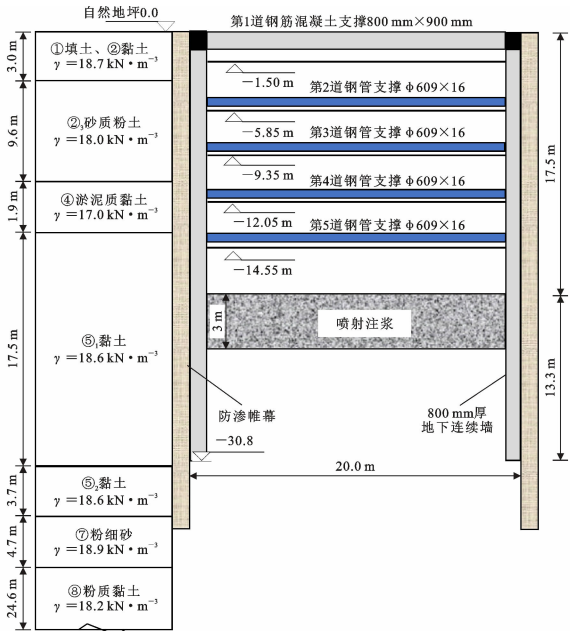


图 2 土层分布和基坑支撑剖面

Fig. 2 Profile of Excavation and Layout of Soil Layers

较高,在开挖过程中需要进行降水。为防止邻近基坑土体水位下降导致结构受损风险增大,对基坑进行了基坑底部注浆和基坑侧边的止水帷幕施工。在大多数情况下,基坑坑底注浆只是作为阻隔渗流的帷幕,并不会限制侧壁的运动。基坑支撑的剖面如图 2 所示。

3 三维有限元模型分析

数值模拟分析计算中关键的问题在于土体本构

模型的选取和模型参数的确定。选取的土体本构模型要既能反映土的主要性质,又能够体现出基坑变形的主要特征。在确定本构模型基础上,根据试验和当地工程经验合理确定或选用模型参数,才能达到较好的模拟效果。土的本构模型有很多种,但是被广泛应用于商业岩土软件的模型并不多。《基坑工程技术标准》(DG/TJ 08-61—2018)^[19]中指出,硬化类的弹塑性模型能够较好地模拟墙体变形和墙后土体变形,适用于基坑开挖的数值模拟分析。HSS 模型在 HS 模型的基础上,考虑了小应变范围内土体剪切模量随着应变增大而衰减的特点,更适用于敏感环境下的基坑工程变形分析。因此,本次模拟中的土体本构模型采用 HSS 模型。

3.1 有限元模型概况

采用 PLAXIS 3D 有限元分析软件建立祁连山南路站基坑开挖过程三维有限元数值模型并进行分析。数值模拟计算中,为了减小模型边界对计算结果的影响,模型高度建议为基坑开挖深度的 2 倍~4 倍,模型一侧距坑边距离为基坑开挖深度的 3 倍~4 倍。标准段 1 基坑开挖深度为 17.5 m,因此有限元模型的高度设置为 65 m,模型边界距基坑边界 60 m,由此建立 210 m×140 m×65 m 的计算模型。数值模型由土体、围护结构和内支撑 3 个部分组成。模型中的土体均采用 10 节点的四面体实体单元模拟,地下连续墙采用 6 节点三角形板单元模拟,内支撑采用 2 节点点对点锚杆单元模拟。水平支撑的布置方式按照 Tan 等^[18]给出的实际内支撑布置情况

进行模拟。由于基坑底部的喷射注浆主要起防渗作用,对基坑变形影响较小,因此在模型中未考虑喷射注浆这一因素。模型底部同时对侧移和竖向位移进行约束,侧边仅约束侧移。整个有限元模型共划分 79 743 个单元、135 236 个节点。

3.2 有限元模型参数取值方法

土体本构模型采用 HSS 模型,根据顾晓强等^[17]提出的上海土体整套 HSS 模型参数方法并结合文献[18]中该项目的土层物理力学参数得到模型参数。为了更好地模拟基坑开挖过程,需要选择模型中土体的排水行为。在 PLAXIS 3D 有限元软件

中,排水行为是指土体中的孔隙水可以自由流动,超孔隙水压力瞬间消散,这一类型适用于渗透性强的土,在模拟加载速度缓慢和长期效应时也可以采用。不排水行为则是指土体中的孔隙水无法排出,因此必须要考虑超孔隙水压力的影响。该类型适用于模拟渗透性弱的土或是模拟加载速度快及短期效应时。本文重点研究基坑开挖过程对周围环境的影响,主要考虑短期效应,因此模型中的黏土和粉土均采用不排水行为,对于渗透性强的砂土层则采用排水行为。各层土体的 HSS 模型参数见表 1。

表 1 各层土体 HSS 模型参数

Table 1 Parameters of HSS Model of Soil Layers

土层名称	e	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	K_0	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	R_f
①填土、②黏土	0.934	4.73	31.78	0.42	3.81	4.31	26.47	93.4	3.2	0.65	0.95
③砂质粉土	1.014	5.98	30.13	0.45	3.45	3.88	24.10	79.9	3.2	0.65	0.94
④淤泥质黏土	1.402	10.33	24.41	0.54	2.04	2.15	14.77	44.4	3.2	0.65	0.59
⑤ ₁ 黏土	0.989	5.61	30.62	0.44	3.56	4.01	24.82	83.7	3.2	0.65	0.95
⑤ ₂ 粉砂	0.982	7.58	27.25	0.54	5.26	6.63	34.53	114.1	3.9	0.7	0.95
⑦粉细砂	0.809	2.20	31.33	0.48	8.68	10.93	52.24	133.4	3.9	0.7	0.95
⑧粉质黏土	0.995	5.70	30.50	0.44	3.53	3.98	24.64	82.8	3.2	0.65	0.95

注: e 为孔隙比; c' 为土的有效黏聚力; φ' 为土的有效内摩擦角; K_0 为初始静止侧压力系数; $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 为标准固结试验测定的参考应力下的切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴固结排水剪切试验测定的参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水加卸载试验测定的参考加卸载模量; m 为模量应力水平相关幂指数; R_f 为三轴排水剪切测定的破坏比;所有计算中参考应力 $p^{\text{ref}}=100\text{ kPa}$,剪胀角 $\Psi=0^{\circ}$,墙-土界面参数 $R_{\text{inter}}=0.67$ 。

基坑的围护结构和布置方式均按照实际工况进行模拟。地下连续墙和内支撑均采用弹性模型,地下连续墙和第 1 道混凝土内支撑的材料弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.2。钢管支撑的弹性模量为 200 GPa。

3.3 有限元模型工况模拟

数值模拟中,地下连续墙施工、土体开挖和支撑的安装均按照项目的实际施工顺序设置。由于基坑底部注浆和基坑侧边设有止水帷幕,基坑的防渗漏措施到位,且黏土层的渗透性非常低,因此认为基坑的坑内疏干降水对抗外水位的影响很小。该基坑内外水的渗流同样可以忽略不计,所以基坑开挖过程中的降水模拟不需要进行稳态渗流分析,而是采用类组水头插值的方法来模拟基坑的降水开挖。在每一步的基坑开挖过程中,将基坑内的土体类组水头设置为开挖面下 0.5 m,用来表示坑内水位降至开挖面以下 0.5 m,基坑外的土体水头不改变,为天然地下水位。随着基坑开挖的进行,坑内水头逐渐降低。基坑四周 5 m 范围内设置 20 kPa 的竖向静荷载,用来模拟坑边的堆载。基坑具体开挖顺序如表 2 所示。

表 2 标准段 1 基坑开挖顺序

Table 2 Excavation Sequence of Standard Section 1

荷载步	工况
0	计算初始地应力场
1	施工围护结构,激活坑边堆载
2	开挖至地表以下 1.50 m,设置第 1 道钢筋混凝土支撑
3	开挖至地表以下 5.85 m,设置第 2 道钢管支撑
4	开挖至地表以下 9.35 m,设置第 3 道钢管支撑
5	开挖至地表以下 12.05 m,设置第 4 道钢管支撑
6	开挖至地表以下 14.55 m,设置第 5 道钢管支撑
7	开挖至地表以下 17.50 m

4 模型计算结果分析

4.1 围护结构侧移分析

图 3 给出了基坑标准段 1 开挖到不同位置时位于标准段 1 中部测点 C17 和端部测点 C20 测得的基坑围护墙侧移实测值和对应位置处的计算模拟值。从 C17 测点的实测值和模拟值可以看出,在开挖到第 4 层时,实测最大变形值为 24.1 mm,而模拟最大变形值为 16.4 mm,实测和模拟的围护墙最大变形均发生在第 4 层的开挖面处,约地下 12 m 处。在开挖到第 5 层时,实测最大变形值为 33.8

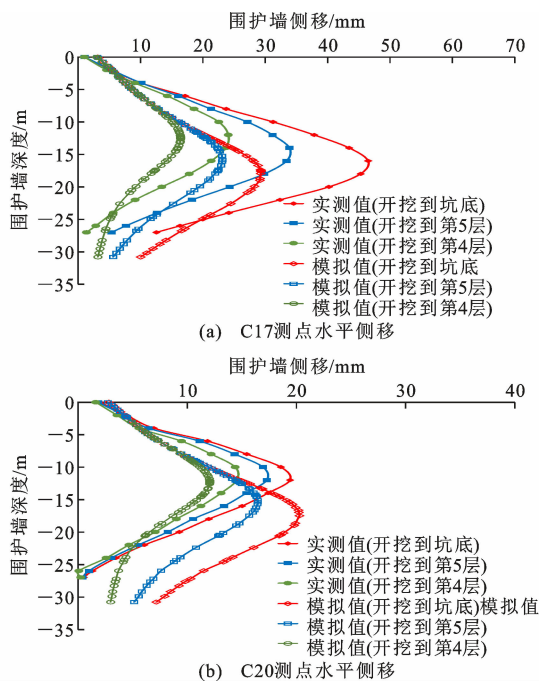


图3 围护结构水平侧移

Fig. 3 Horizontal Displacements of Retaining Structures

mm,而模拟最大变形值为23.1 mm,实测和模拟的围护墙最大变形均在第5层的开挖面处,约地下15 m处。开挖到基坑底部时,实测最大变形值为46.5 mm,而模拟最大变形值为29.3 mm,最大变形发生在坑底附近,地下17.5 m处。模型的模拟值相比实测值偏小,约为实测值的70%,这可能是该测点位置附近的变形控制措施不到位导致。实测和模拟的变形模式接近,与Ou等^[20]提出的深基坑变形模式类似,均为“内凸型”。随着基坑开挖深度的不断增大,基坑围护结构的侧移也逐渐增大。围护墙最大变形发生在当前基坑开挖面处。

从C20测点侧移的实测值和模拟值对比来看,不同开挖阶段的围护结构侧移最大值非常接近,但实测最大变形发生位置位于坑底上方5 m左右,而模拟的最大变形发生在坑底附近。

图4为标准段1其他测点的围护结构最大侧移实测值与模拟值的对比。所有测点实测最大侧移的平均值为31.6 mm,对应的模拟最大侧移值的平均值为26.9 mm,相差4.7 mm,差距较小。大部分测点的实测值同对应的模拟值非常接近,说明该三维有限元模型能够有效地模拟基坑围护结构的变形。同时基坑变形的空间效应也有所体现,位于基坑长边中部的测点C10,C11,C17,C18所测得的围护结构最大侧移明显大于基坑角部的测点值,其中C17测点的侧移值大于2倍的C20测点对应围护结构

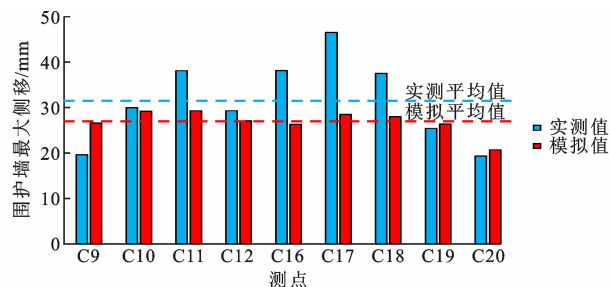


图4 不同测点处模拟和实测的最大侧移

Fig. 4 Maximum Horizontal Deformations of Different Points in Simulation and Measurement

侧移值。三维有限元模型同样体现了基坑中部变形大于端部变形这一特点,表明长条形地铁深基坑有明显的空间效应,因此采用三维模型进行地铁深基坑模拟更加合理。

4.2 坑外地表沉降分析

图5为基坑开挖到坑底时,基坑中部的坑外地表沉降模拟值和对应位置测点G5的实测值对比。G5测点的实测值有所缺失,但从获得的3个孔位的数据对比来看,实测点落在了模拟坑外地表沉降曲线附近,模型较好地模拟了坑外地表沉降变形,说明采用该模型能够较好地预测基坑开挖过程中坑外的地表沉降。实测坑外地表沉降的最大值为32.1 mm,发生在距坑边5 m范围内,为开挖深度的0.29倍。模拟的坑外地表沉降最大值为23.4 mm,位置在距坑边3 m处,为基坑开挖深度的0.17倍。基坑的坑外地表沉降曲线形状接近Hsieh等^[21]给出的沉降曲线模型。沉降测点G5位于C10与C11测点之间,C10与C11测点的实测平均最大侧移值为34.0 mm,G5测点处的模拟最大侧移值为29.3 mm。研究结果表明:模拟的坑外地表沉降最大值 δ_{vm} 与模拟的围护结构水平最大侧移 δ_{hm} 之比为0.80,最大地表沉降实测值 δ_{vm} 与围护结构最大侧移实测值 δ_{hm} 之比为0.94。这一结果与王卫东等^[22]提出的上海地区地表最大沉降 δ_{vm} 介于 $0.4\delta_{hm} \sim 2.0\delta_{hm}$ 的范围吻合,其平均值为 $0.81\delta_{hm}$ 。

从围护结构水平侧移和坑外地表沉降结果可以看出,三维有限元模型的计算结果同实测结果较为吻合,并且符合相关研究提出的基坑变形曲线模型,说明采用HSS模型及相应的模型参数能够有效地预测基坑开挖的变形,三维有限元模型能够很好地体现出基坑开挖变形的空间效应。

5 结 语

(1)数值模拟分析结果表明,采用HSS模型和

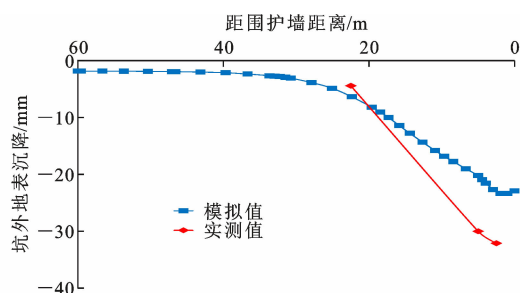


图 5 坑外地表沉降对比

Fig. 5 Comparison of Ground Surface Settlements Outside Pit

合理的参数取值方法能够有效地模拟上海地区地铁深基坑的变形,对工程施工有较好的指导作用。

(2)基坑的端部与中部变形差距较大,采用二维平面应变模型无法体现这一现象,利用三维有限元模型进行基坑开挖的数值模拟更为合理。

(3)长窄型地铁基坑的坑长边中部位置的围护结构侧移大于基坑角部位置,呈现明显的空间效应,建议利用三维有限元模型进行基坑开挖的数值模拟。在工程设计中,应重视基坑长边中部位置,做好针对性措施。

参考文献:

References:

- [1] 王卫东,王浩然,徐中华.上海地区板式支护体系基坑变形预测简化计算方法[J].岩土工程学报,2012,34(10):1792-1800.
WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Simplified Method of Deformation Prediction for Excavations Retained by Embedded Walls in Shanghai Soft Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1792-1800.
- [2] BURLAND J B. Small Is Beautiful — The Stiffness of Soils at Small Strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 499-516.
- [3] ATKINSON J H, SALLFORS G. Experimental Determination of Stress-strain-time Characteristics in Laboratory and In-situ Tests[C]//SMFE. Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: Balkema A A, 1991: 915-956.
- [4] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The Hardening Soil Model: Formulation and Verification [C]//SMFE. Proceedings of the International Symposium. Amsterdam: Balkema A A, 1999: 281-296.
- [5] BENZ T. Small-strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences [D]. Stuttgart: University of

Stuttgart, 2007.

- [6] BENZ T, SCHWAB R, VERMEER P. Small-strain Stiffness in Geotechnical Analyses[J]. Bautechnik Engineering, 2009, 86(S1): 16-27.
- [7] SCHWEIGER H F, VERMEER P A, WEHNERT M. On the Design of Deep Excavations Based on Finite Element Analysis[J]. Geomechanics and Tunneling, 2009, 2(4): 333-344.
- [8] 王卫东,王浩然,徐中华.基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J].岩土力学,2012,33(8): 2283-2290.
WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental Study of Parameters of Hardening Soil Model for Numerical Analysis of Excavations of Foundation Pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [9] 李青,徐中华,王卫东,等.上海典型黏土小应变剪切模量现场和室内试验研究[J].岩土力学,2016,37(11):3263-3269.
LI Qing, XU Zhong-hua, WANG Wei-dong, et al. Field and Laboratory Measurements on Shear Modulus of Typical Shanghai Clay at Small Strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3263-3269.
- [10] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等.上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(2): 269-278.
LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental Study on Parameters of HSS Model for Soft Soils in Shanghai [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269-278.
- [11] 张娇.上海软土小应变特性及其在基坑变形分析中的应用[D].上海:同济大学,2017.
ZHANG Jiao. Small Strain Stiffness Properties of Shanghai Soft Soils and Application in Deformation Analysis of Deep Excavations [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [12] 顾晓强,陆路通,李雄威,等.土体小应变刚度特性的试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2018,46(3):312-317.
GU Xiao-qiang, LU Lu-tong, LI Xiong-wei, et al. Experimental Study of Small Strain Stiffness Properties of Soil[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2018, 46(3): 312-317.
- [13] 陆路通.上海土体小应变特性的试验研究及其在基坑工程中的应用[D].上海:同济大学,2018.
LU Lu-tong. Experimental Study on the Small Strain Properties of Soil in Shanghai and Its Application in Excavation [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.

- [14] 谢东武,管 飞,丁文其.小应变硬化土模型参数的确定与敏感性分析[J].地震工程学报,2017,39(5):898-906.
XIE Dong-wu, GUAN Fei, DING Wen-qi. Determination and Sensitivity Analysis of the Parameters of Hardening Soil Model with Small Strain Stiffness[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 898-906.
- [15] 尹 骥.小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J].岩土工程学报,2010,32(增1):166-172.
YIN Ji. Application of Hardening Soil Model with Small Strain Stiffness in Deep Foundation Pits in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 166-172.
- [16] 陈少杰,顾晓强,高广运.土体小应变剪切模量的现场和室内试验对比及工程应用[J].岩土工程学报,2019,41(增2):133-136.
CHEN Shao-jie, GU Xiao-qiang, GAO Guang-yun. Comparison and Application of Small Strain Shear Moduli from Field and Laboratory Measurements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 133-136.
- [17] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等.上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J].岩土力学,2021,42(3):833-845.
GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS Model Parameters for Shanghai Soils with Engineering Verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845.
- [18] TAN Y, WEI B, DIAO Y P, et al. Spatial Corner Effects of Long and Narrow Multipropped Deep Excavations in Shanghai Soft Clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(4): 04014015.
- [19] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].
DG/TJ 08-61—2018, Technical Code for Excavation Engineering[S].
- [20] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of Ground Surface Settlement During Excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758-767.
- [21] HSIEH P G, OU C Y. Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused by Excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [22] 王卫东,徐中华.预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J].岩土工程学报,2010,32(增1):32-38.
WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Simplified Analysis Method for Evaluating Excavation-induced Damage of Adjacent Buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 32-38.