

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.007

文章编号:1672-9331(2022)03-0069-09

引用格式: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.

Citation: 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.

超大深基坑开挖变形演化规律及优化设计

何忠明¹, 王盘盘¹, 王利军², 张耀², 陈勇超¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510380)

摘要:【目的】研究复杂环境下超大深基坑开挖变形演化规律,并对支护结构进行优化设计。【方法】依托广州地铁 11 号线基坑工程,利用有限差分软件 FLAC^{3D} 对基坑开挖工程中支护结构的水平位移及周围土体地表沉降的变化规律进行研究,并通过分析地下连续墙的厚度、嵌固深度及支撑层数对基坑变形的影响,对基坑支护结构进行优化,对优化前后支护结构的支护效果进行对比分析。【结果】各工况下基坑周围土体的地表沉降呈先增大后减小的趋势,且最大沉降发生在距基坑边缘 15.0 m 的位置;不同嵌固深度下地下连续墙水平位移的变化趋势和基坑周围土体地表沉降的变化趋势基本相同;地下连续墙厚度的改变对其水平位移和基坑周围土体地表沉降的影响不明显;支撑层数的增加可显著减小基坑地下连续墙的水平位移及周围土体的最大地表沉降;支护结构优化后,基坑开挖引起的周围土体的最大地表沉降减小了 23.88%,地下连续墙的最大水平位移减小了 19.19%。【结论】在设计同类型基坑时应重视支撑层数的选取,必要时可适当减小支护结构的厚度。

关键词: 深基坑开挖;数值模拟;演化规律;优化设计

中图分类号: U456

文献标志码: A

随着地下空间的进一步开发、地铁车站以及地下民用工程的出现,基坑工程越来越多,并逐渐朝着更大、更深以及周边环境越来越复杂的方向发展^[1-4]。基坑开挖每加深 1.0 m,卸载状态下土体的工程性质及力学状态就会发生巨大变化,风险也会明显增大^[5]。因此,在超大深基坑的施工过程中,如何保证深基坑工程的稳定、降低基坑工程的开挖和支护对周围环境的影响是目前亟须继续深入研究的工程问题。

近年来,国内外学者在基坑开挖变形影响规律及基坑开挖模拟方面进行了大量研究,并取得了一些成果^[6-7]。何世秀等^[8]对某深基坑的原状饱和和粉质黏土试样进行了不排水卸荷试验,并分

析了该土样在卸载条件下的应力应变关系。陈昆等^[9]对某深基坑的监测数据及数值模拟结果进行分析,认为在深基坑开挖设计时应考虑土体的卸荷效应。廖少明等^[10]对多个地铁车站基坑的实测数据进行全面对比,对苏州地区不同形状、采用不同挡土结构的深基坑的变形性状进行了分析。丁智等^[11]对浙江软弱土深基坑的侧移曲线与周围地表沉降曲线的特点进行分析,研究开挖深度对基坑最大水平位移的影响。可见,现有研究已对基坑开挖变形以及基坑开挖对周围环境的影响有了初步认识^[12-13],但在考虑深基坑开挖变形并进行基坑支护的结构设计优化方面仍有不足。

本研究以实际基坑工程项目为背景,采用犀

收稿日期:2021-11-04;修回日期:2022-02-23;接受日期:2022-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978084);广州地铁集团有限公司科研项目(HT200856);湖南省研究生科研创新项目(CX20210752)

通信作者:何忠明(1980-)(ORCID:0000-0002-4587-0160),男,教授,主要从事岩土工程方面的研究。

E-mail:hezongming45@126.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

牛软件建立三维模型,使用有限元差分软件FLAC^{3D}对地下连续墙水平位移的变化规律以及采用原有支护方案时基坑周边土体地表沉降的变化规律进行研究,并对基坑地下连续墙的嵌固深度、厚度以及支撑结构层数对地表沉降以及地下连续墙水平位移的影响进行研究,在此基础上提出优化的基坑工程设计方案,验证优化后的基坑设计方案的有效性和合理性。本研究成果对类似基坑的设计和施工具有一定的参考价值。

1 工程介绍

1.1 工程概况

琶洲站为广州城际铁路与地铁11号线的合建车站,位于会展东路与新港东路交叉口附近,采

用明挖法施工,车站区间宽73.0 m,城际配线区间宽47.8 m。基坑总长526.0 m,其最小开挖深度为28.8 m,最大开挖深度为34.4 m,开挖面积及深度都较大,属于超大深基坑工程^[14-15]。基坑东侧紧挨广州国际采购中心,西接广州国际会展中心,在南侧与保利世界贸易中心和中洲中心相望,基坑明挖区北端为阅江中路地下人行通道。基坑处于繁华地段,人流密集,周边建筑均离基坑较近,施工期间需对这些建筑采取一定的保护措施。

1.2 工程地质

琶洲站位于珠江干流与支流黄埔涌之间,所处位置为海陆交互的冲积平原,地势平坦,场地范围内的土层由下至上依次为微风化岩土层、中风化岩土层、强风化岩土层、粉土层、黏性土层、砂层、淤泥土层、填土层。各土层的力学参数见表1。

表1 琶洲站各土层的力学参数
Table 1 Mechanical parameters of each soil layer of Pazhou station

土层	密度/ (g·cm ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	变形模量/ MPa	泊松比	层厚/ m
微风化岩土层	2.6	500	40	2 780	0.294	23.4
中风化岩土层	2.5	250	30	850	0.291	20.0
强风化岩土层	2.1	40	25	100	0.280	18.6
粉土层	2.0	17	10	22	0.253	4.7
黏性土层	2.0	24	12	15	0.312	5.7
砂层	1.9	0	26	20	0.233	6.5
淤泥土层	1.6	9	4	4	0.393	7.8
填土层	2.0	12	15	3	0.261	3.3

1.3 基坑设计方案

基坑地下连续墙的浇筑采用等级为C35的水下混凝土,厚度为1 000 mm,嵌固深度为2.5 m。支撑结构共有4道支撑,前3道为钢筋混凝土边桁架对撑,最后1道为钢支撑竖向斜撑。钢筋混凝土对撑的宽度为9.0 m,每组对撑之间的边桁架跨度为27.0 m,竖向斜撑的水平间距为3.0 m。

2 数值模型的建立

2.1 计算模型的简化

根据已有的建模经验,本研究采用FLAC^{3D}有限差分软件对基坑开挖的全过程进行模拟计算。由于琶洲站基坑为长条形基坑,为提高计算

效率,将基坑长度适当缩减。根据建模经验,基坑开挖对周边环境的影响范围的半径约为挖深的1~4倍,影响深度约为挖深的2~4倍。结合基坑施工方案及基坑特性,最终确定基坑的平面尺寸为150 m×73 m,开挖深度为29.8 m,计算模型的尺寸为300 m×260 m×60 m,模型共有117 851个节点,108 800个网格^[16],基坑三维计算模型如图1所示,支护结构模型如图2所示。模型底面对x、y、z方向的位移进行约束,模型4个侧面对法向位移进行约束,模型上表面为自由面。

采用摩尔-库伦本构模型对土体的应力应变行为进行描述。超大深基坑支护材料的基本参数见表2。

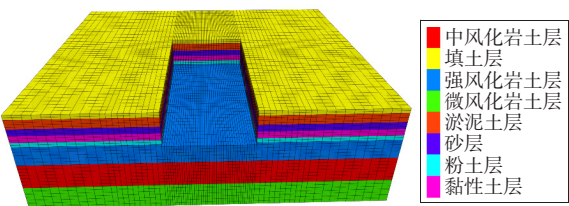


图 1 基坑三维计算模型

Fig. 1 3D calculation model of the foundation pit

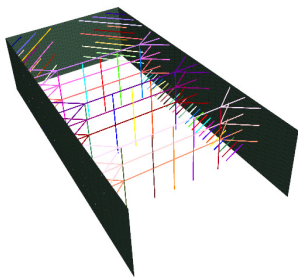


图 2 支护结构模型

Fig. 2 Support structure model

表 2 支护材料的基本参数

Table 2 Basic parameters of supporting materials

材料	支撑位置/m	截面尺寸/mm		弹性模量/GPa	泊松比
		长(直径)	宽(厚度)		
钢管	-24.9	800	20	206	0.300
钢筋混凝土	-17.9	1 200	1 000	32	0.167
	-9.7	1 200	900		
	-1.5	1 000	800		

2.2 模拟过程

根据工程实际的设计和施工情况,采用明挖法由上至下进行开挖。基坑第 1 层至第 4 层的开挖深度依次为 2.0、8.2、8.2 和 7.0 m,在每层开挖至层底时,在层底向上 50 cm 处架设支撑。各模拟工况见表 3。

表 3 模拟工况

Table 3 Simulated operating conditions

工况	施工方法
1	当挖掘至地面以下 2.0 m 时,使用第 1 道支撑
2	当挖掘至地面以下 10.2 m 时,使用第 2 道支撑
3	当挖掘至地面以下 18.4 m 时,使用第 3 道支撑
4	开挖至地面以下 25.4 m 时,使用第 1 道钢支撑
5	开挖至坑底并进行底板施工

3 超大深基坑开挖模拟

3.1 基坑周围土体竖向位移分析

随着原状土体的开挖,基坑内部持续存在的土体卸载破坏了土体的初始应力,使基坑内的土体应力重新分布,从而导致基坑周围土体的沉降发生了变化,甚至发生了深层水平位移。基坑开挖完成后,基坑周围土体的竖向位移云图及各工况下基坑周围土体的沉降曲线如图 3~4 所示。

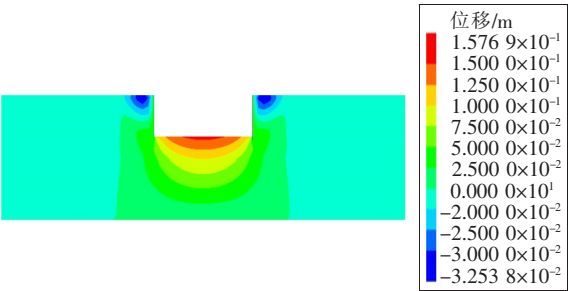


图 3 基坑周围土体的竖向位移云图

Fig. 3 Vertical displacement nephogram of soil around the foundation pit

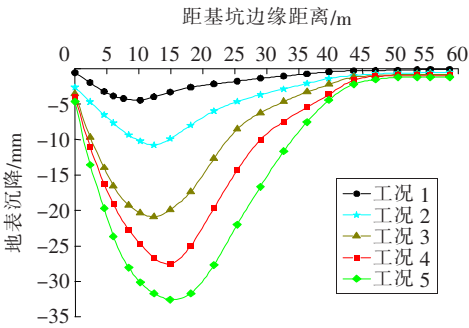


图 4 不同工况下的地表沉降曲线

Fig. 4 Surface settlement curves under different operating conditions

由图 4 可知,随着距基坑边缘距离的增大,各工况下基坑周围土体的地表沉降呈先增大后减小的趋势,并在距离基坑一定位置处达到最大值。工况 1 的最大地表沉降为 4.18 mm,随着基坑开挖深度的增加,基坑周围土体的沉降也在持续增大,工况 2~5 的最大地表沉降分别比工况 1 的大了 6.61、16.23、23.34 和 28.36 mm。5 个工况的最大沉降均发生在距离基坑边缘约 15.0 m 的位置,这是由于地下连续墙和混凝土支撑限制了基坑附近土体的自由变形,使最大沉降未出现在基坑边

缘附近。在离基坑 40.0 m 处的地表沉降仅为 1.00 mm。因此,在基坑的实际施工过程中应对距基坑边缘 15.0 m 左右的地表的沉降加强监测。

3.2 地下连续墙水平位移分析

图 5~6 所示分别为施工开挖完成后地下连续墙的水平位移云图及各工况下地下连续墙的水平位移曲线。由图 6 可知,随着基坑施工的持续进行,地下连续墙的水平位移不断增加,各工况下地下连续墙的最大水平位移也从基坑顶部逐渐向下移动。由于工况 1 的开挖深度小,刚度较大的钢筋混凝土的支撑作用限制了地下连续墙顶部的位移变形,墙体沿深度方向的水平位移呈悬臂型,因而影响深度较小;对于工况 2~5,施工完成后,地下连续墙的水平位移曲线为中间大、两头小的近似抛物线,且未出现脚踢形曲线,说明设置内支撑可以有效地控制地下连续墙的水平变形;开挖至基坑底部时地下连续墙的水平位移最大,为 20.53 mm,出现在地表以下 15.49 m 处。

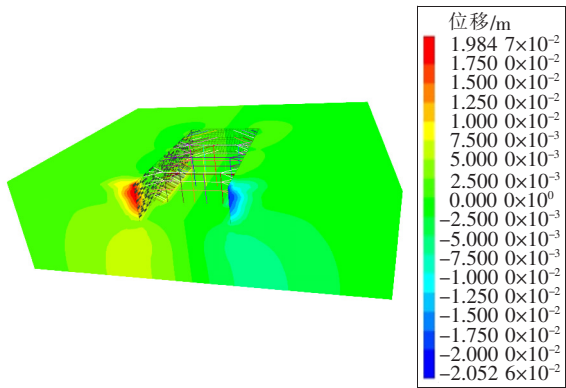


图 5 基坑水平位移云图

Fig. 5 Horizontal displacement nephogram of the foundation pit

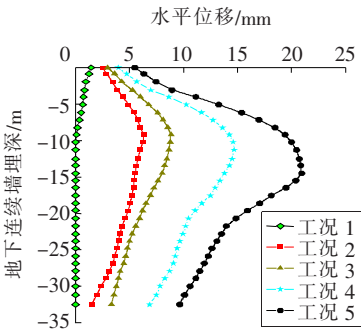


图 6 不同工况下地下连续墙的水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curves of diaphragm wall under different operating conditions

4 超大深基坑支护结构优化设计

4.1 地下连续墙嵌固深度对基坑变形的影响

为研究地下连续墙的嵌固深度对基坑变形的影响,取嵌固深度 D 分别为 2.5、5.0、7.5 和 10.0 m,其他参数不变的情况进行分析。图 7 所示为不同嵌固深度下地下连续墙的水平位移曲线,图 8 所示为不同嵌固深度下的地表沉降曲线。由图 7~8 可以看出,在不同嵌固深度下地下连续墙的水平位移和基坑周围地表沉降的变化趋势基本相同。当嵌固深度由 2.5 m 增大到 5.0 m 时,地下连续墙的最大水平位移减小了 2.52 mm,而地表最大沉降减小了 2.43 mm;当嵌固深度由 5.0 m 增大到 7.5 m 时,地下连续墙的最大水平位移由 18.01 mm 减小到了 14.70 mm,而地表最大沉降减小了 1.33 mm;当地下连续墙的嵌固深度由 7.5 m 增大到 10.0 m 时,地下连续墙的最大水平位移以及地表最大沉降未见明显减小。由此可知,

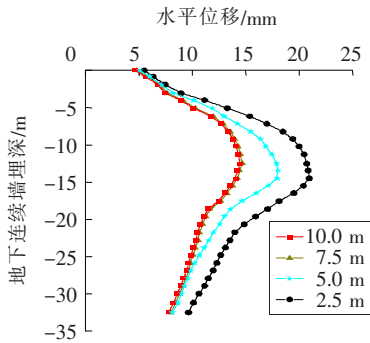


图 7 不同嵌固深度下地下连续墙的水平位移曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curves of diaphragm wall at different embedded depths

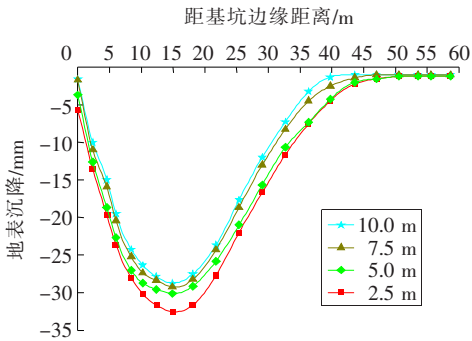


图 8 不同嵌固深度下的地表沉降曲线

Fig. 8 Surface settlement curves at different embedded depths

当地下连续墙的嵌固深度超过 7.5 m 时,对地下连续墙水平位移及地表沉降的控制效果较差,此时若继续增加地下连续墙嵌入土体的深度,只会徒增工程成本。

4.2 地下连续墙厚度对基坑变形的影响

根据规范及成槽机的规格,对地下连续墙的厚度分别为 600、800、1 000 和 1 200 mm,其他参数不变的情况进行分析。经计算,当地下连续墙的厚度为 600 mm 时,计算过程不收敛,说明 800 mm 是适宜模拟计算的最小地下连续墙厚度。

图 9 所示为不同地下连续墙厚度下各工况的最大水平位移曲线,图 10 所示为不同地下连续墙厚度下各工况的最大地表沉降曲线。

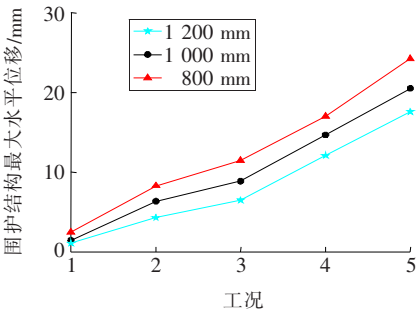


图 9 不同地下连续墙厚度下各工况的最大水平位移

Fig. 9 Maximum horizontal displacement of each operating condition under different thickness of diaphragm wall

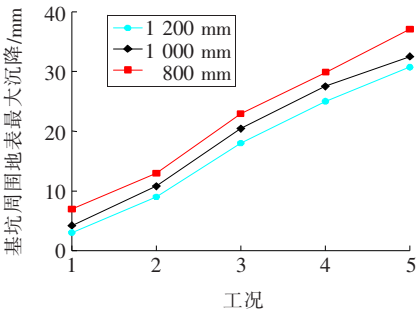


图 10 不同地下连续墙厚度下各工况的地表最大沉降

Fig. 10 Surface maximal settlement of each operating condition under different thickness of diaphragm wall

由图 9~10 可知,当地下连续墙的厚度从 800 mm 增大至 1 000 mm 时,各工况下地下连续墙的最大水平位移减小了近 3.74 mm,地表最大沉降减小了约 2.58 mm;当地下连续墙的厚度从 1 000

mm 增大至 1 200 mm 时,工况 1 的地下连续墙的最大水平位移变化较小,但其他工况的地下连续墙的最大水平位移减小了近 2.93 mm,地表最大沉降减小了约 1.80 mm。由此可见,地下连续墙厚度的改变会对其水平位移和地表沉降产生一定的影响,但并不会改变墙体变形和地表沉降的整体变化规律。

4.3 内支撑层数对基坑稳定性的影响

本研究在原有支撑的基础上通过增加 1 至 2 层内支撑来分析内支撑层数对基坑稳定性的影响。支撑方案见表 4,计算结果见图 11~12。

表 4 支撑方案

Table 4 Support schemes

方案	描述
4	在第 1、2 层及第 3、4 层之间各添一层内支撑
3	在第 2 层和第 3 层之间多添一层内支撑
2	在前 2 层之间多添一层内支撑
1	保持原有支护条件

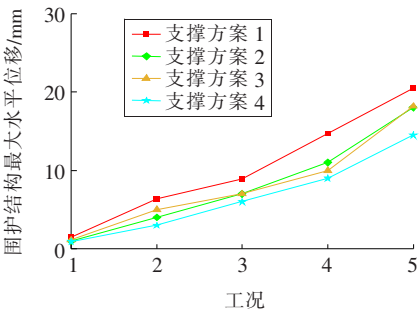


图 11 不同支撑方案下各工况地下连续墙的最大水平位移

Fig. 11 Maximal horizontal displacement of diaphragm wall of each operating condition under different support schemes

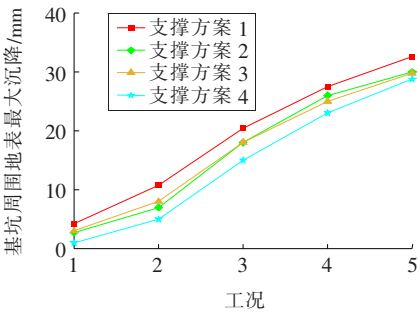


图 12 不同支撑方案下各工况的地表最大沉降

Fig. 12 Surface maximal settlement of each operating condition under different support schemes

由图 11~12 可知,与原有的支护条件相比,支撑方案 2 增加了 1 层位于基坑中上部的支撑,这对控制地下连续墙上部结构的变形以及基坑前期开挖引起的地表最大沉降较明显,而支撑方案 3 增加了 1 层位于基坑中下部的支撑,这对控制地下连续墙下部结构的变形以及基坑后期开挖引起的竖向最大沉降较明显,且方案 2 和方案 3 中地下连续墙的变形和基坑开挖引起的周围土体的最大沉降均明显小于方案 1 的;当采用支撑方案 4 时,因增加了 2 层内支撑,与前 3 个方案相比,地下连续墙的水平位移和基坑开挖引起的周边土体的最大沉降均明显减小,最大沉降仅为 28.76 mm。这说明内支撑的层数越多,基坑地下连续墙的水平位移及周围土体的最大沉降越小,但增加内支撑的层数势必会增加基坑的工程造价。因此,在实际工程中应选择合适的支撑层数,降低工程造价。

5 支护结构优化前后的对比

5.1 支护系统的优化

综上所述,当地下连续墙的嵌固深度由 2.5 m 增大至 5.0 m 时,地下连续墙的水平位移和基坑周围土体的沉降明显减小;当嵌固深度从 5.0 m 增大至 7.5 m 时,地下连续墙的水平位移虽然也有所减小,但减小得不多;而当嵌固深度由 7.5 m 增大至 10.0 m 时,地下连续墙水平位移的减小速度较小,工程经济效益也较差。因此,优化后支护结构的地下连续墙的嵌固深度宜选为 5.0 m。

当地下连续墙的厚度为 800 mm 时,虽然其水平位移有所增大,但仍可满足规范要求;当地下连续墙的厚度为 1 200 mm 时,其水平位移及周围土体的沉降稍有减小,但效果并不明显。考虑到经济因素,优化后支护结构的地下连续墙的厚度宜取为 800 mm。

由于该基坑工程地处城市繁华地段,若地表沉降过大,将产生严重后果。支撑方案 1 在抑制地表沉降及地下连续墙的变形方面略有不足;支撑方案 2 和方案 3 可显著提高基坑工程的稳定性;支撑方案 4 虽然在控制变形方面效果明显,但也较大幅度地提高了工程成本。因此,优化后支护结构的内支撑层数宜选为 5 层。

在数值模拟计算及分析的基础上,本研究对原有的支护结构进行了分析和改进,得到优化后的支护结构,见表 5。

表 5 支护结构优化前后参数的对比
Table 5 Comparison of parameters of the support structures before and after optimization

支护结构 优化情况	地下连续墙		内支撑层数
	嵌固深度/m	厚度/mm	
优化前	2.5	1 000	4
优化后	5.0	800	5

5.2 支护结构优化前后效果的对比

5.2.1 基坑周围土体地表沉降的对比

图 13 所示为支护结构优化前后基坑周围土体的地表沉降曲线。由图 13 可知,支护结构优化前后基坑周围土体地表沉降的变化规律基本一致,支护结构优化后的地表沉降明显减小,且地表最大沉降减小得最为明显,由 32.54 mm 减小到了 24.77 mm,减少了 23.88%,满足规范要求的 25 mm 的安全警戒线。而且支护结构优化后,基坑开挖的影响范围大幅缩小。由此可见,优化后的支护结构明显减小了基坑开挖对周边环境的影响,且在保证工程经济效益较好的同时,也使施工安全和工程质量得到了保障。

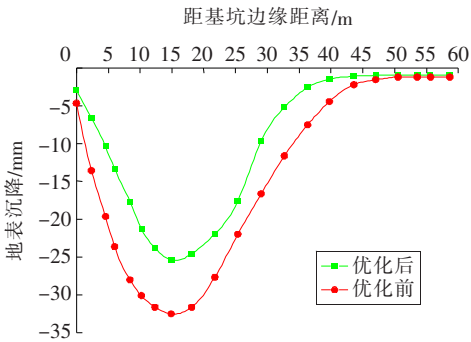


图 13 支护结构优化前后的地表沉降曲线
Fig. 13 Surface settlement curves of support structures before and after optimization

5.2.2 地下连续墙水平位移的对比

图 14 所示为支护结构优化前后地下连续墙的水平位移曲线。由图 14 可知,支护结构优化后,虽然地下连续墙的厚度有所减小,但由于新增了 1 道内支撑,且增大了地下连续墙的嵌固深度,使得地下连续墙的水平位移从顶部到底部均得到

了较好的控制,尤以对上部变形的控制最为明显。支护结构优化后,地下连续墙的最大水平位移由 20.53 mm 减小到了 16.59 mm,减小了 19.19%,满足现行规范的要求。

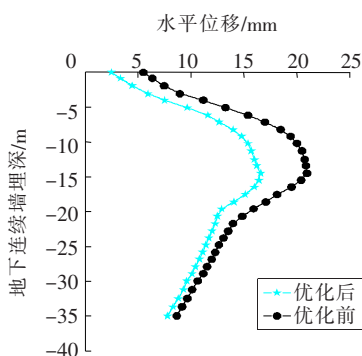


图 14 优化前后地下连续墙的水平位移曲线

Fig. 14 Horizontal displacement curves of diaphragm wall before and after optimization

优化后的支护结构比优化前的增加了地下连续墙的内支撑层数以及地下连续墙的嵌固深度,但减小了地下连续墙的厚度,此外,地下连续墙的造价相对较高。因此,优化后的支护结构兼顾了经济性和安全性,综合比较来看是合理和有效的。

6 讨论

近年来,国内外学者在基坑开挖模拟方面进行了大量研究,并在基坑开挖变形以及基坑开挖对周围环境的影响方面取得了一些研究成果,但在考虑深基坑开挖变形并进行基坑支护的结构设计优化方面仍鲜有研究。

本研究以广州地铁琶洲站超大深基坑工程为背景,采用理论分析与三维数值模拟相结合的研究方法,对超大深基坑开挖造成邻近土体及地下连续墙变形的演化规律进行了研究,结果发现在广州典型地层条件下,支撑层数的增加可显著减小基坑地下连续墙的水平位移及周围土体的最大沉降。根据前期研究成果对支护结构方案进行优化设计后,基坑开挖对邻近土体及地下连续墙变形的影响明显降低。研究成果可为类似基坑的设计和施工提供参考。

本研究在对深基坑的开挖变形及设计优化进行研究时,仅采用了数值模拟方法,下一步将结合依托项目的现场监测数据进行更深入、系统的研究。

7 结论

1) 随着基坑施工的进行,各工况下基坑周围土体的地表沉降均呈先增大后减小的趋势,最大沉降发生在距基坑边缘 15.0 m 的位置,最大沉降为 32.54 mm。在实际的施工过程中,应对距基坑边缘 15.0 m 左右的地表沉降加强监测。

2) 随着基坑施工的进行,地下连续墙的水平位移不断增大,各工况下的最大水平位移也从顶部逐渐向下移动。开挖至基坑底部时地下连续墙的水平位移最大,为 20.53 mm,最大位移点出现在地表以下 15.49 m 处。

3) 不同嵌固深度下地下连续墙的水平位移和基坑周围土体地表沉降的变化趋势基本相同。当嵌固深度超过 7.5 m 时,嵌固深度对地下连续墙的水平位移及地表沉降的控制效果较差,此时继续增大地下连续墙的嵌固深度只会徒增工程成本;地下连续墙厚度的改变对地下连续墙的水平位移和地表沉降有一定的影响,但并不会改变墙体变形和地表沉降的整体变化规律;在基坑开挖支护过程中,支撑架设层数越多,基坑地下连续墙的水平位移及周围土体的最大沉降越小,但增加内支撑层数势必会增加基坑的工程造价,所以应选择合适的支撑层数,避免造成经济上的浪费。

4) 支护结构优化前后,基坑周围土体地表沉降的变化规律基本一致。支护结构优化后,地表沉降有所减小,且以地表最大沉降减小得最为明显,基坑开挖的影响范围也大幅缩小。支护结构优化后,地下连续墙的水平位移从顶部到底部均得到了较好的控制,且以中上部最为明显。因此,在同类型基坑设计时应注重支撑层数的选取,必要时可相应地减小支护结构的厚度。

〔参考文献〕

- [1] HSIUNG B C, YANG K H, AILA W, et al. Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 138-151. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.07.001.
- [2] 雷鹏,余霞,罗亮.基于颗粒流程序分析河道采砂对堤防稳定性的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 45-50. DOI: 10.3969/j.issn.

- 1672-9331. 2020. 03. 007.
- LEI Peng, YU Xia, LUO Liang. Analysis of the influence of sand mining on the stability of embankment based on particle flow code [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 45-50. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9331. 2020. 03. 007.
- [3] 张贵金, 宋伟, 何学春, 等. 裂隙岩体边坡开挖渠道脉动灌浆预加固措施论证[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(4): 32-43. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9331. 2021. 04. 005.
- ZHANG Guijin, SONG Wei, HE Xuechun, et al. Demonstration of pulsating grouting pre-reinforcement measures for excavation channels on fractured rock slope[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(4): 32-43. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9331. 2021. 04. 005.
- [4] 桂铭, 沙策, 刘霖. 基于数值分析的回填型岩溶隧道施工技术研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 20-25. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-6099. 2018. 03. 005.
- GUI Ge, SHA Ce, LIU Lin. Construction technology for backfill-type karst tunnel structures based on numerical analysis[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(3): 20-25. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-6099. 2018. 03. 005.
- [5] 陈勇超. 广州地铁琶洲站超大深基坑开挖变形与支护结构优化设计研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. DOI: 10. 26985/d. cnki. gcsjc. 2020. 000709.
- CHEN Yongchao. Research on optimal design of excavation deformation and support structure of deep foundation pit of super large subway[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. DOI: 10. 26985/d. cnki. gcsjc. 2020. 000709.
- [6] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [7] 张戈, 毛海和. 软土地区深基坑围护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1467-1474. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2016. 05. 031.
- ZHANG Ge, MAO Haihe. A new system stiffness of retaining structure of deep foundation pit in soft soil area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1467-1474. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2016. 05. 031.
- [8] 何世秀, 韩高升, 庄心善, 等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2003(1): 17-20. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2003. 01. 003.
- HE Shixiu, HAN Gaosheng, ZHUANG Xinshan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(1): 17-20. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2003. 01. 003.
- [9] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075-1082. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2016. 04. 021.
- CHEN Kun, YAN Shuwang, SUN Liqiang, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1075-1082. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2016. 04. 021.
- [10] 廖少明, 魏仕锋, 谭勇, 等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458-469. DOI: 10. 11779/CJGE201503009.
- LIAO Shaoming, WEI Shifeng, TAN Yong, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 458-469. DOI: 10. 11779/CJGE201503009.
- [11] 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(S1): 506-512. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2015. S1. 088.
- 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. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2015. S1. 088.
- [12] 何向玲, 吴东云, 周嘉宾. 逆作深基坑围护结构变形空间效应分析[J]. 铁道建筑, 2011(10): 72-74. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-1995. 2011. 10. 023.
- HE Xiangling, WU Dongyun, ZHOU Jiabin. Analysis on spatial effect of deformation of retaining structure of reverse construction deep foundation pit [J]. Railway Engineering, 2011(10): 72-74. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-1995. 2011. 10. 023.
- [13] 闫旭丽, 姚爱军, 周一君, 等. 基坑施工邻域隧道围土应力路径演变规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1528-1540.
- YAN Xuli, YAO Aijun, ZHOU Yijun, et al. Analysis on the stress path of soil around existing tunnels influenced by adjacent excavation of foundation pits [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1528-1540.
- [14] 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. DOI: 10. 1671-8879. 2020. 06. 008.
- WANG Lijun, QIU Junjun, HE Zhongming, et al. Influence of excavation of super deep foundation pit on deformation of adjacent metro tunnel[J]. Journal

of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40 (6): 77-85. DOI: 10. 19721/j. cnki. 1671-8879. 2020. 06. 008.

[15] 陈勇超,何忠明,王利军,等. 复杂环境下超大深基坑开挖变形演化规律研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 33-36, 42. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-6099. 2020. 02. 007. CHEN Yongchao, HE Zhongming, WANG Lijun, et al. Law of deformation for large-scale deep foundation pit excavated in a complex environment [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40 (2): 33-36, 42. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-6099. 2020. 02. 007.

[16] 胡浩军,王元汉. 深基坑开挖与支护模拟仿真分析[J]. 岩土力学, 2007, 28 (S1): 669-672. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2007. s1. 146. HU Haojun, WANG Yuanhan. Simulation and analysis of foundation excavation and support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (S1): 669-672. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2007. s1. 146.

Deformation evolution law and optimization design of huge deep foundation pit excavation

HE Zhongming¹, WANG Panpan¹, WANG Lijun², ZHANG Yao², CHEN Yongchao¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510380, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to study the deformation evolution law of the excavation of huge deep foundation pits in complex environments and optimize the design of support structures. [Methods] Based on the foundation pit engineering of Guangzhou Metro Line 11, the variation laws of the horizontal displacement of support structures and the surface settlement of the surrounding soil were studied by using the finite-difference software FLAC^{3D} in the foundation pit excavation project. By analyzing the influence of the embedded depth, the thickness of the diaphragm wall, and the number of layers of support structure on the deformation of the foundation pit, the support structure of the foundation pit was optimized. The support effect before and after the optimization of the support structure was compared and analyzed. [Findings] Under different operating conditions, the surface settlement of the surrounding soil first increases and then decreases, and the largest settlement occurs at the position of 15.0 m from the edge of the foundation pit; Under different embedded depths, the variation trends of the horizontal displacement of diaphragm wall and the surface settlement of surrounding soil are basically the same; The change of the thickness of diaphragm wall has no obvious effect on its horizontal displacement and surface settlement; The increase of the number of support layers can significantly reduce the horizontal displacement of the support structure and the maximal settlement of the surrounding soil. After the optimization of support structures, the maximal settlement of the surrounding soil is reduced by 23.88%, and the maximal horizontal displacement of diaphragm wall is reduced by 19.19%. [Conclusions] In the design of the same type of foundation pit, attention should be paid to the selection of the number of support layers. The thickness of support structure can be appropriately reduced if necessary.

Key words: deep foundation pit excavation; numerical simulation; evolution law; optimization design

Manuscript received: 2021-11-04; **revised:** 2022-02-23; **accepted:** 2022-03-01

Foundation item: Project(51978084) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(HT200856) supported by Scientific Research Program of Guangzhou Metro Group Co., Ltd.; Project(CX20210752) supported by Post-graduate Research Innovation Program of Hunan Province

Corresponding author: HE Zhongming (1980 —) (ORCID: 0000-0002-4587-0160), male, professor, research interest: geotechnical engineering. E-mail: hezhongming45@126.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:栗森)