

超大深基坑开挖对周围环境变形影响及对策分析

董利虎¹, 宋丹青², 唐高杰³, 靳远⁴, 王海涛⁴

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410000; 4. 中国核工业中原建设有限公司, 北京 100142)

摘要: 为研究超大复杂深基坑施工对邻近环境变形的影响,以河南省郑州市龙湖金融岛项目基坑工程为例,采用全站仪对基坑内支护桩顶、内支撑格构柱及坑外地面进行监测,利用多点位移计对支护桩旁土体进行测斜,通过分析基坑周围环境的位移时空变化特征,探究基坑支护桩、坑外土体及基坑变形的协调性。结果表明:基坑施工过程中,支护结构及周围建筑物沉降变形特征可分为土方开挖、垫层施工、内支撑拆除和垫层完工4个阶段;土方开挖及内支撑拆除阶段,支护桩桩顶、格构柱及邻近地面沉降变形较大,垫层施工对基坑变形具有减弱作用;土方开挖、垫层施工及内支撑拆除阶段,相邻格构柱间不均匀沉降使格构柱变形增大;基坑开挖主要对邻近管廊的沉降变形具有影响,特别是土方开挖前期邻近管廊的变形出现快速增大。针对基坑开挖过程中存在的问题提出了工程技术措施。

关键词: 超大复杂深基坑; 周围环境; 变形分析; 位移监测; 工程对策

中图分类号:TV551.4⁺2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)01-0199-07

Influence of super-large deep foundation pit excavation on the deformation of surrounding environment and countermeasures

DONG Lihu¹, SONG Danqing², TANG Gaojie³, JIN Yuan⁴, WANG Haitao⁴

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410000, China; 4. China Nuclear Industry Zhongyuan Construction Co., Ltd., Beijing 100142, China)

Abstract: In order to investigate the influence of super-large complex deep foundation pit excavation on the surrounding environmental deformation, taking the Longhu Finance Island project in Zhengzhou City, Henan Province as an example, the total station meter was used to monitor the supporting pile top, the internal supporting grid columns and the ground surface outside the pit, and the multi-point displacement meter was used to survey the slope of the soil around the supporting pile. And then the spatio-temporal evolution characteristics of displacement of surrounding buildings near the foundation pit was analyzed to investigate the coordination of the supporting pile, external soil mass and the foundation pit deformation. The research results show that the settlement and deformation characteristics of the supporting structure and surrounding buildings can be divided into four stages in the excavation process of the foundation pit, namely earthwork excavation, cushion construction, internal support removal and cushion completion. During the earthwork excavation and internal support removal stage, the settlement deformation of the supporting pile top, the internal supporting grid columns and the surrounding ground is large, and the cushion construction has a weakening effect on the foundation pit deformation. In the stages of earthwork excavation, cushion construction and internal support removal, the uneven settlement between adjacent grid columns increases the deformation of the columns. The excavation mainly affects the settlement deformation of the adjacent pipe gallery, which accelerates the deformation of the gallery in the incipient

收稿日期:2021-07-03; 修回日期:2021-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52109125); 中国博士后科学基金项目(2020M680583); 博士后创新人才支持计划项目(BX20200191); 清华大学“水木学者”计划项目(2019SM058)

作者简介:董利虎(1995-),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为多能源系统与电力网络分析。

通讯作者:宋丹青(1989-),男,河南郑州人,博士,助理研究员,主要从事岩土体动力特性方面的研究。

stage of earthwork excavation in particular. Finally, the engineering measures are put forward in view of the problems in the process of foundation pit excavation.

Key words: super-large complex deep foundation pit; surrounding environment; deformation analysis; displacement monitoring; engineering countermeasure

1 研究背景

随着我国城市现代化建设的高速发展,城市地下空间正逐渐向深部延伸,地下空间建设将不可避免地遇到超大复杂深基坑工程施工问题^[1]。尤其是地铁、超高层建筑及大型城市商业综合体等建设使基坑开挖工程面临规模深度增大、周边施工环境愈加复杂、施工周期成本增加等问题,基坑工程的规模、深度及施工环境的复杂性均大幅度提高^[2-3]。超大复杂深基坑变形及其施工对周围建筑物稳定性、变形和环境效应的影响日益受到重视^[4-5]。

深基坑开挖引起周边土体变形,进而导致周边建筑物出现变形破坏^[6-8]。周边建筑物变形的影响因素较为复杂,主要包括与基坑的距离、周围地表沉降、基坑的类型及深度等^[9-12]。超大复杂深基坑施工引起周边环境变形是一个涉及岩土与结构相互作用的复杂科学问题^[13-14]。目前,许多学者在深基坑施工及其对周围环境的影响方面进行了研究。冉启仁等^[15]采用室内模型试验探究了基坑开挖对群桩桩身水平位移和弯矩的影响,分析了基坑深宽比及地下连续墙墙趾埋深等参数对周围建筑物桩基的影响规律。Zhang 等^[16]、Song 等^[17]和刘波^[18]采用现场监测方法研究了基坑施工对周围地层沉降及建筑物变形的影响。Wang 等^[19]利用模型试验方法探研究了基坑水位下降过程中分层沉降的局部膨胀现象,并采用数值模拟进行了验证。叶帅华等^[20]、陈昆等^[21]针对某复杂环境下深大基坑采用现场监测及数值模拟方法,研究了基坑施工过程中支护结构及周边土体的变形特征。刘念武等^[22]采用位移监测方法研究了软土深开挖导致地铁车站深基坑工程围护结构及邻近建筑变

形的特性。上述研究在一定程度上揭示了基坑施工对周围建筑物变形的影响规律。但由于超大复杂深基坑施工过程较为复杂,难以充分了解基坑开挖与邻近环境的相互作用机制,尤其是针对人工湖内超大复杂深基坑方面的研究较少,研究超大深基坑施工对周围环境变形的时空分布特征仍是一项重要的课题。

以河南省郑州市龙湖金融岛为例,基坑工程位于人工湖内,具有四面环水、开挖面积大、深度大及周围建筑物数量多的特点,属于典型的超大复杂深基坑工程。采用全站仪及多点位移计对基坑工程施工过程中支护桩桩顶、支护桩旁基坑内侧土体、内支撑格构柱、基坑外地表沉降及邻近管廊结构的位移进行长期的监测。通过分析基坑施工过程中周围环境的位移变化规律,详细分析了不同基坑施工阶段对周边环境变形的影响,同时针对遇到的具体工程问题提出了相应的对策。

2 实例基坑工程概况及工程问题

2.1 工程简介

河南省郑州市龙湖金融岛位于龙湖中部,由双环44栋高层建筑构成,总面积为1.07 km²,是未来郑东新区以金融办公和商业为核心的新型区域。金融岛基坑工程共分为6组,所有地下基坑连接为一个整体。本研究以其中某一组基坑为例,该基坑面积约为6×10⁴ m²,开挖深度约为15 m,其周边环境及施工现场如图1所示。经现场勘查可知,基坑绝对高程为84~86 m,地下水位较高,地下水水位埋深为11.0~17.0 m;地下土层主要为粉质性砂土和细砂土,厚度达到50~70 m,含有铁板砂硬质夹层和富水黏土层等软弱夹层,基坑主要土层参数如表1所示。



(a) 基坑工程位置及周边环境



(b) 基坑工程施工现场

图1 实例基坑工程周边环境及施工现场情况

表 1 基坑主要土层参数

土层	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	压缩模量 E /MPa
粉质性砂土	18.0	0	25.0	14.5
细砂土	20.0	0	30.0	22.5

2.2 基坑工程施工及问题

TRD 工法 (trench-cutting & re-mixing deep wall method) 在滨海地区富水软弱土层有较强适用性,本项目引入 TRD 工法机在砂土层地区使用(图 1 (b)),经分析,墙厚、膨润土掺量等参数对施工影响较大,控制不好容易塌孔,造成埋钻。基坑工程的支护及止水设计形式为 TRD 止水帷幕 + 坑内支护排桩 + 内支撑,止水帷幕及支护布置参见图 2。止水帷幕深度约为 28 m,水泥掺和比为 0.25;靠近中央内环路一侧的止水帷幕为 0.7 m 厚度的 TRD 水泥土搅拌墙,其余侧止水帷幕为 $\Phi 850@600$ 的三轴搅拌桩。基坑工程周边环境较为复杂,其外侧为外龙湖,内侧紧邻金融岛中央内环路及综合管廊,内环路与基坑之间设有多个管廊附属物,中环管廊设计有多个疏散楼梯,疏散楼梯距离基坑约为 0.5 m,且该疏散楼梯设计为独立基础,其基础与中环管廊基础之间设置有沉降后浇带,且车库与后期地铁车站、穿湖隧道等无缝衔接,施工组织难度大。临近综合管廊侧基坑剖面见图 3。

基坑工程施工于 2018 年 4 月开始,现场支护施工于 2018 年 7 月完成。在此期间,基坑及周边建筑

物的相关监测数据较为稳定,处于正常变形范围内。2018 年 8 月底,在基坑内进行内支撑下方的土方和锚索施工。由于基坑紧邻外龙湖,在施工过程中存在渗水现象。施工期基坑工程地下水位变化率及内外湖水水位监测数据如图 4 所示。由图 4 中水位监测数据变化规律可知,施工过程中基坑周边地下水位出现大幅度变化,由于坑外土体对基坑支护结构的影响,支护排桩出现向基坑内沉降变形加速的现象。若采取的工程措施不当或不及时,将会导致基坑工程出现大变形甚至破坏。因此,在基坑工程施工过程中,针对面临的工程问题,采用全站仪对支护桩顶、内支撑格构柱及坑外地面沉降进行长周期监测,同时为分析基坑支护桩、坑外土体及基坑变形的协调性,采用多点位移计对支护桩旁土体进行测斜,测点平面布置如图 5 所示。以下选取典型测点的监测数据进行分析。

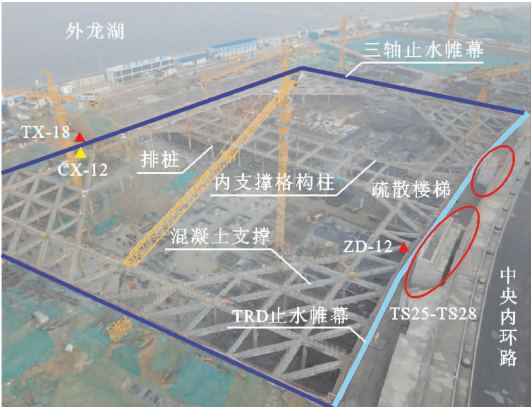


图 2 大深基坑工程止水帷幕及支护布置

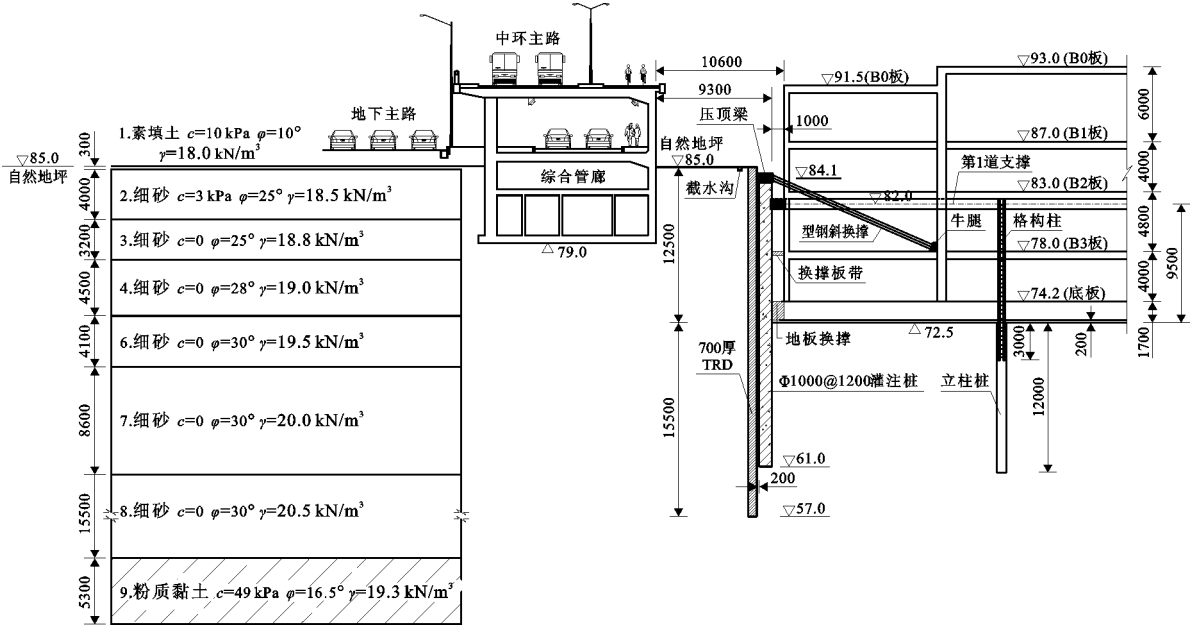


图 3 超大深基坑工程临近综合管廊侧剖面图(尺寸单位:mm,高程单位:m)

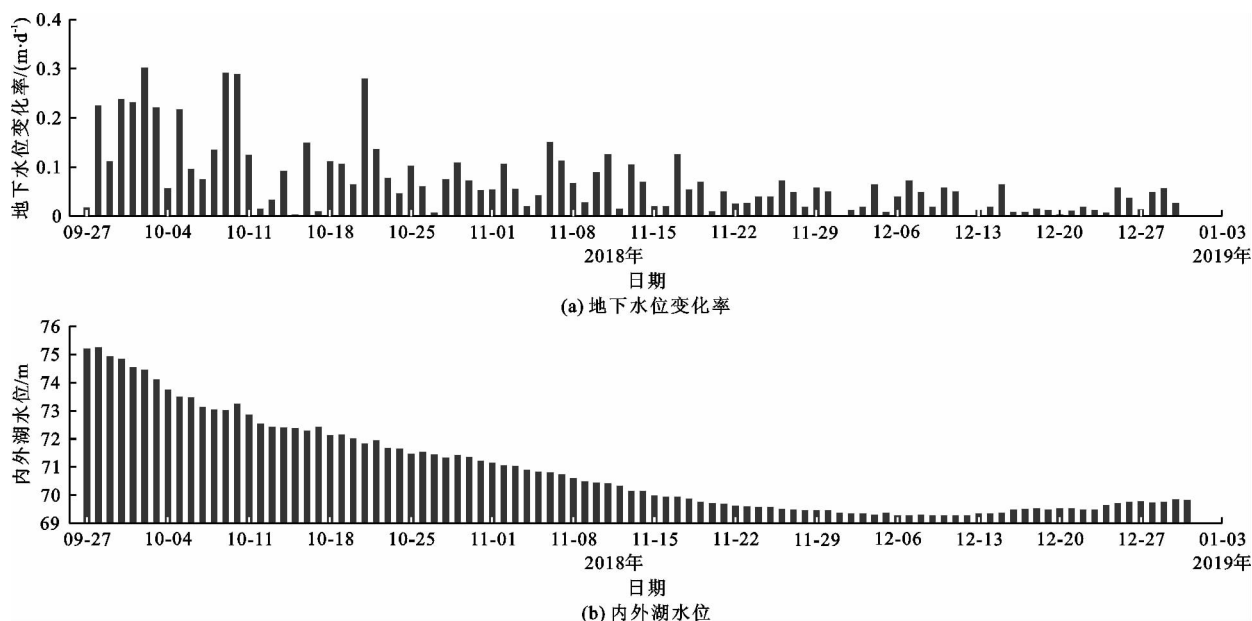


图4 基坑施工期地下水位变化率及内外湖水位

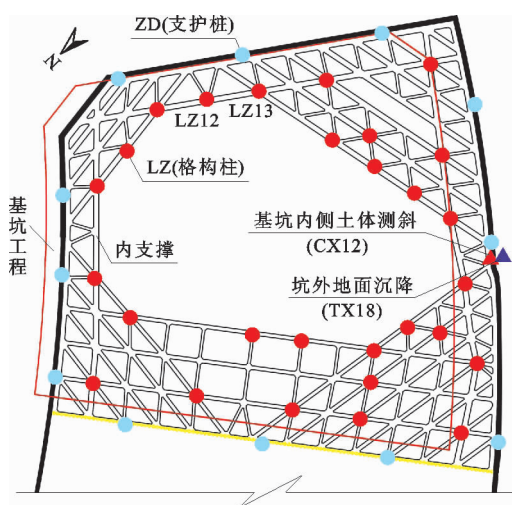


图5 基坑测点平面布设

3 基坑施工对周围环境变形影响

3.1 基坑支护桩桩顶变形分析

以疏散电梯附近支护桩测点 ZD-12 (测点位置见图2) 为例, 支护桩桩顶水平位移变化曲线如图6所示。图6表明, 桩顶的水平累积位移约为 39.0 mm, 结合基坑施工进度, 根据其水平位移的时间变化特征可以将桩顶变形分为4个阶段。第1阶段为土方开挖阶段, 随着基坑开挖, 支护桩顶的水平位移快速增大, 在该阶段土方开挖破坏了区域的地应力平衡, 导致基坑的变形加剧。第2阶段为垫层及其上部结构施工阶段, 支护桩桩顶水平位移随着时间表现为明显的非线性增长特征, 随着垫层上部主体结构施工进度加快, 桩顶水平位移表现出波动现

象, 并逐渐趋于某一稳定值; 该阶段由于垫层及其上部结构施工对支护桩具有较大的支撑作用, 使支护桩的变形速率大幅减小。第3阶段为内支撑拆除阶段, 在该阶段进行型钢斜抛撑换撑施工, 导致支护桩桩顶出现向基坑内的短时间位移增大现象, 这是由于内支撑拆除阶段支护结构的受力体系出现了较大的变化, 支护桩桩顶由原来的简支受力变为悬挑受力, 导致支护桩出现快速的变形。第4个阶段为内支撑更换完成阶段, 在该阶段随着时间的增长, 桩顶水平位移趋于稳定。

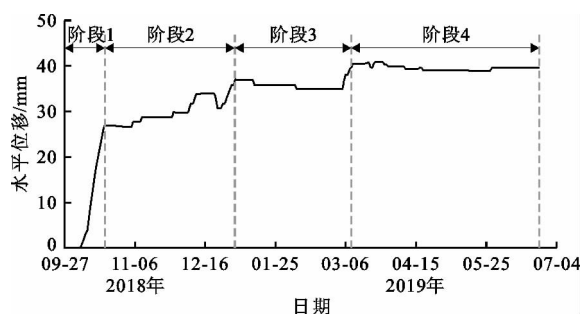


图6 基坑内侧支护桩桩顶水平位移变化曲线(测点 ZD-12)

由此可知, 基坑施工过程中, 土方开挖阶段对支护桩桩顶的变形影响较大, 垫层及其上部结构施工对支护桩的变形具有一定的减缓作用, 内支撑拆除阶段对支护桩的变形具有不利的影响, 而在内支撑拆除约 15 d 后支护桩变形逐渐趋于稳定。此外, 支护桩为钢筋混凝土刚体, 支护桩随着基坑内土方开挖出现旋转变形, 支护桩的极限位移为 10 cm。坑外土体变形可以真实地反映基坑的整体变形及稳定

性,当支护桩位移及邻近土体的位移大于极限位移时,将会导致基坑周边地面出现裂缝。

3.2 格构柱变形分析

土方开挖的卸荷作用将导致内支撑格构柱出现垂直向的隆升变形。基于监测数据可知,相邻格构柱测点 LZ12 和 LZ13(其位置见图5)的垂直向隆升位移较大,两测点隆升位移分别约为 21 和 15 mm。因此,以 LZ12 和 LZ13 为例,通过分析不同基坑施工阶段的隆升位移,研究基坑开挖对内支撑格构柱变形的影响。LZ12 和 LZ13 的垂直位移及二者的垂直位移差 Δ (Δ = 测点 LZ12 垂直位移 - 测点 LZ13 垂直位移)随时间的变化曲线如图7所示。

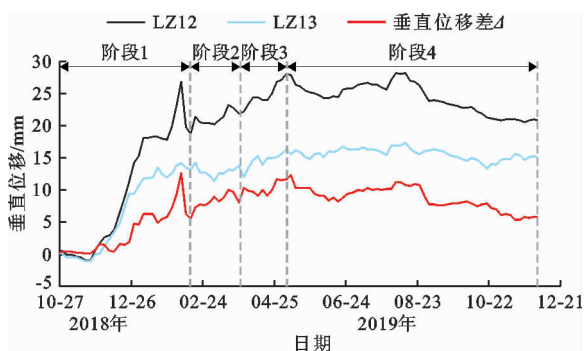


图7 格构柱测点 LZ12 和 LZ13 垂直位移及其位移差变化曲线

由图7可知,在阶段1(土方开挖阶段),格构柱 LZ12 和 LZ13 的垂直位移随着基坑的开挖而快速增大,整体表现为先线性增大然后波动增大,这表明土

方开挖阶段对内支撑格构柱的变形具有较大的影响。在阶段2(垫层及其上部结构施工阶段),格构柱的垂直位移出现一定程度的减小,这是由于随着垫层的施工,基坑底部开始逐渐封闭,格构柱的变形随之减小,其垂直累计位移趋于稳定。在阶段3(内支撑拆除阶段),格构柱的垂直位移出现不断的波动,且随施工过程而增大,这是由于采用型钢换撑导致其变形增大。在阶段4(垫层完工阶段),随着土方开挖的完工及垫层的逐渐闭合,格构柱的垂直位移逐渐趋于稳定并呈减小趋势。此外,由图7还可以看出,相邻格构柱 LZ12 和 LZ13 的垂直位移差在阶段1表现为快速增大趋势,在阶段2随着垫层的施工垂直位移差有所减小,但在阶段2和3整体上表现为波动增大趋势,而在阶段4表现为波动减小趋势。这说明阶段1~3的土方开挖及内支撑拆除对格构柱的变形具有不利影响,垫层施工虽然使单个格构柱的垂直累计位移减小,但该阶段内支撑尚未拆除,格构柱间的不均匀沉降仍会对相邻格构柱变形产生影响。随着垫层施工的逐渐完成,格构柱的隆升变形得以控制及减弱。

3.3 基坑临近管廊变形分析

为研究基坑开挖对邻近管廊结构的影响,以距离基坑 0.5 m 处的管廊附属物疏散楼梯(测点位置见图2)为例,疏散楼梯4个测点(TS25~TS28)的垂直、水平位移及位移差随时间变化曲线如图8所示。

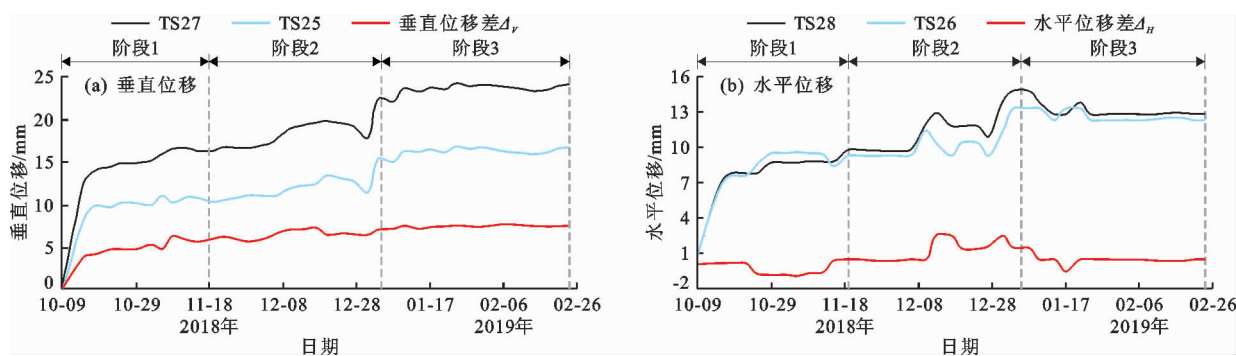


图8 基坑外疏散楼梯测点 TS25~TS28 垂直、水平位移及位移差变化曲线

图8表明,疏散楼梯的变形大致可分为3个阶段。在阶段1(土方开挖前期阶段),疏散楼梯各测点的垂直及水平位移随着土方的开挖而增大,位移增速在初期表现为快速增大而后减缓;在阶段2(土方开挖后期阶段),疏散楼梯的垂直及水平位移随土方的开挖而逐渐增大,但增大速率较小;在阶段3(土方开挖完成阶段),随着垫层施工的逐步完成,疏散楼梯各测点的垂直及水平位移变形增量逐渐减

小,变形趋于稳定,例如 TS25 和 TS27 的垂直累计位移分别趋于 16.8 和 24.1 mm。由此可知,土方开挖前期对邻近管廊的变形影响较大,后期对其变形影响较小,土方开挖完成后其变形趋于稳定。此外,对比图8(a)和8(b)可知,疏散楼梯相邻两测点(TS27、TS25)的垂直累计位移差约为 7.3 mm,而相邻两测点(TS28、TS26)的水平累计位移差基本趋于 0,同时疏散楼梯的垂直位移明显大于水平位移,这

说明基坑开挖主要对邻近管廊结构的沉降变形影响较大,而对水平向的变形影响相对较小。

3.4 基坑外侧地面沉降变形分析

基坑施工过程中,由于基坑周边地面出现沉降变形,导致基坑周边出现了较多的裂缝,特别是在顶梁附近的裂缝较为明显。为研究基坑开挖对周边地面沉降变形的影响,根据地面裂缝较为明显的位置,以支护桩旁基坑内缘土体测斜点 CX12 和坑外土体沉降变形测点 TX18 为例进行分析(两测点位置见图 5),其中测点 TX18 位于距离基坑边缘 1.5 m 处。两测点的沉降位移及其位移差变化曲线如图 9 所示。

图 9 表明,基坑外土体的变形特征与支护桩的变形相似,整体上可分为 4 个阶段。阶段 1 为基坑土方开挖阶段,该阶段基坑内侧土体与基坑外地面沉降位移快速增大。阶段 2 为垫层施工阶段,测点 CX12 和测点 TX18 的位移增大速率减缓,但其值仍然较大;阶段 3 为内支撑拆除阶段,测点 CX12 和测点 TX18 的累计位移整体上保持原增大速率继续增大;阶段 4 为垫层完工阶段,测点 CX12 和测点 TX18 的累计位移逐渐趋于稳定。由此可知,土方开

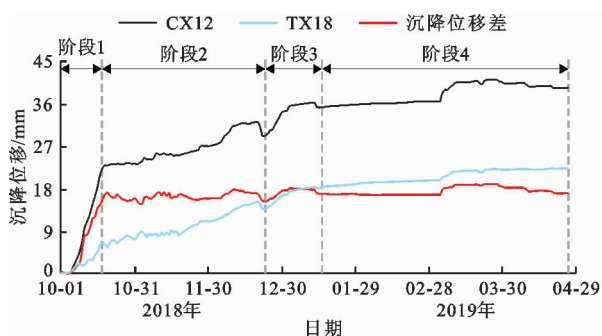


图 9 基坑内侧及坑外土体测点 CX12 和 TX18 沉降位移及位移差变化曲线

挖阶段对基坑内侧土体及坑外地面沉降变形影响较大,垫层施工并未明显减小基坑内侧土体及坑外地面的沉降变形。此外,由图 9 可知,在土方开挖阶段即阶段 1,基坑内侧土体与坑外地面沉降位移差快速增大,累计位移差约为 18.0 mm,而在后 3 个阶段的累计位移差基本上趋于稳定。这说明在土方开挖阶段支护桩与坑外土体的相对变形较大,容易诱发坑外地面裂缝。这是由于基坑内支护桩为刚体,而基坑外侧土体为塑性散状颗粒体,在土方开挖过程中,坑内支护桩和坑外土体均出现向基坑内侧的水平位移,但桩体水平位移明显大于土体位移,桩、土之间的位移差导致其间出现空隙,进而造成桩顶附近的地面产生裂缝。

为研究基坑周围土体深层侧向位移的变化规律,在距地墙不同距离位置土体内设置多个测点进行观测。土体深层侧向位移变化曲线如图 10 所示。图 10 表明,基坑周围土体深层侧向位移随深度表现为先增大后减小的趋势;基坑开挖深度范围内的土体侧向位移快速增大,说明基坑开挖对基坑开挖深度内临近土体变形影响较大。

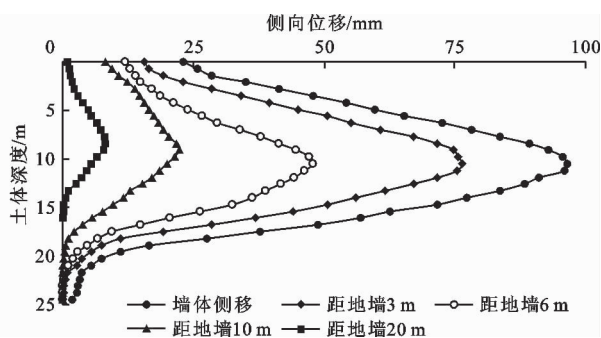


图 10 距地墙不同距离的基坑周围土体深层侧向位移变化曲线

4 基坑施工工程问题及其对策

基于超大复杂深基坑施工过程中存在的具体工程问题,提出如下针对性工程技术措施:

(1) 针对地下水位高、砂性土质透水性较大、保水性差等特点,在深厚砂层中进行支护桩和止水帷幕等施工容易造成卡钻、抱钻的现象,可通过试验优化水泥掺量、膨润土掺量、钻进速度等施工参数,以确保施工质量。

(2) 针对基坑开挖存在的渗水现象,其原因及相应的工程对策如下:①止水帷幕漏水,可在渗漏处采用快硬水泥抹面,并设导管引流,压入聚氨酯封堵导管;②地面水渗入止水帷幕与排桩间隙,需进行坑

外积水排除,同时进行地面裂缝灌缝封堵;③未开挖区域土体滞水,应提前 7~15 d 进行预降水,更换抽水泵及排水管,增加出水量,插设两级轻型井点。

(3) 支护桩与坑外土体沉降差导致地面出现裂缝,应及时对地面裂缝进行灌浆处理,并且裂缝的监测频次应大于 1 次/d;同时对垫层进行分块浇筑,每块面积约为 100~500 m²;尽早进行筏板施工并将坑底封闭,铺设筏板钢筋,确保基坑安全稳定。

(4) 内支撑相邻格构柱间的不均匀沉降导致变截面处出现应力集中,从而产生微裂缝。一般情况下,应将相邻格构柱的差异沉降控制在极限差 20 mm 以内,同时将开挖面高差控制在 1 m 内,并加快垫筏施工。

(5)内支撑拆除前后,基坑支护受力体系发生变化,基坑顶部变为悬挑端,拆撑阶段桩顶位移增大。拆撑前应在开始拆除部位增加监测点位,且监测频次不低于1次/d;采用组合式内支撑拆除关键技术:绳锯切割+钢马凳支撑+叉车外运,该技术可以代替传统机械破除工艺,具有无扬尘、无安全隐患、成本低、切割效率高等优点。

(6)采用“盆式”基坑土方开挖方式,“盆式”开挖对撑下区域先见底,该区域筏板负4层施工完成后,可以拆除对撑,拆除后该区域可以直接向上施工,并与其他区域形成流水;与“岛式”分层的土方开挖方式相比,该开挖方式较优。此外,采用“跳仓法”施工(图11),将面积为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的地下室划分为16个流水段,采用“跳仓法”施工具有如下优点:整层地下室无后浇带施工;筏板可提前60 d封闭,缩短降水时间;实现人、材、机最优配置,单层可节约工期8 d。

上述工程措施已在本工程中进行了应用及验证,工程进展及现场调查结果表明,提出的工程对策具有很强的适用性和高效性,可为同类工程提供科学参考依据。

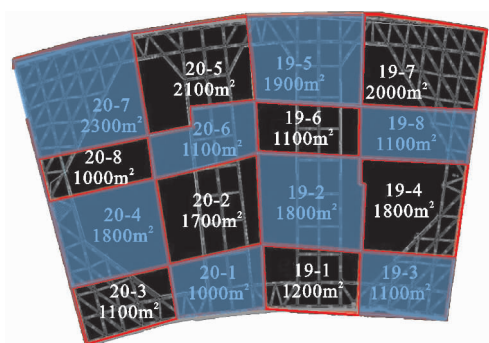


图11 基坑“跳仓法”施工方式示意图

5 结 论

(1)在超大复杂深基坑施工过程中,支护桩桩顶及基坑外地面沉降变形可分为4个阶段,即基坑内土方开挖阶段、垫层及其上部结构施工阶段,内支撑拆除阶段和垫层完工阶段。土方开挖阶段对支护桩桩顶及基坑外地面沉降变形影响较大,在该阶段二者变形快速增大;垫层施工及基底封闭对二者变形具有减弱作用,有利于基坑的稳定性;内支撑拆除会进一步加剧基坑的变形,但内支撑拆除后基坑变形逐渐趋于稳定。

(2)基坑开挖对基坑内格构柱变形影响较大,在土方开挖阶段,土方开挖和卸荷引起格构柱出现

快速的垂直向隆升变形。随着垫层的施工,格构柱的隆升变形减小,但内支撑拆除后格构柱变形在短时间内出现一定程度的增大,拆撑完毕15 d后格构柱变形趋于稳定。相邻格构柱位移差分析表明,在土方开挖、垫层施工及内支撑拆除3个阶段,相邻格构柱间不均匀沉降对格构柱变形影响较大,不均匀沉降使相邻格构柱的变形增大。

(3)基坑开挖对邻近管廊的变形具有较大的影响。在土方开挖初期,邻近管廊的变形出现较大幅度的增大;在土方开挖后期,邻近管廊的变形速率较小;随着土方开挖的完工及垫层施工的进行,邻近管廊的变形逐渐趋于稳定。基坑开挖主要对邻近管廊的垂直沉降变形具有较大的影响,而对水平变形影响较小;疏散电梯的垂直及水平最大位移分别约为24和15 mm。

(4)总结了超大复杂深基坑施工过程中遇到的工程问题,并针对不同施工阶段的工程问题提出了相应的工程技术对策,可为同类基坑工程在施工过程中的基坑及周围环境的变形控制提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] LI Shuchen, XIE Can, LIANG Yanhong, et al. Seepage flow model and deformation properties of coastal deep foundation pit under tidal influence[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 9714901. DOI:10.155/2018/9714901.
- [2] 郑翔,汤继新,成怡冲,等. 软土地区地铁车站深基坑施工全过程对邻近建筑物影响实测分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(10):128-134.
- [3] 王建望,苏成,宁啸青,等. 两端临空明挖深基坑支护结构受力特征研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5):1-6.
- [4] ZHANG Chuang, LI Jianzhong, HE Yong. Application of optimized grey discrete Verhulst-BP neural network model in settlement prediction of foundation pit[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(15): 441.
- [5] 代仲海,赵俊伟. 沿海某机场扩建工程基坑监测分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):201-206.
- [6] 张卫兵,张刚柱,韩自刚,等. 基于HS-Small本构模型的银川地区深基坑开挖-降水过程数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2):211-218.
- [7] 刘颖,相斌辉,扶名福. 沿海地区复杂地质条件下三角形深大基坑变形实测分析与数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5):207-212+217.
- [8] 邱明明,杨果林,段君义,等. 砂土地排桩围护挡墙渗漏水对基坑变形规律的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6):194-200.

(下转第224页)

- [15] 宋安利. 陕北山地苹果节水灌溉制度研究——以绥德县为例[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 219–224.
- [16] SPEELMAN S, FAROLFI S, PERRET S, et al. Irrigation water value at small-scale schemes: Evidence from the North West Province, South Africa [J]. International Journal of Water Resources Development, 2008, 24(4): 621–633.
- [17] MUCHARA B, ORTMANN G, MUDHARA M, et al. Irrigation water value for potato farmers in the Mooi River Irrigation Scheme of KwaZulu – Natal, South Africa: A residual value approach[J]. Agricultural Water Management, 2016, 164(Part 2): 243–252.
- [18] ZIOLKOWSKA J R. Shadow price of water for irrigation—A case of the High Plains[J]. Agricultural Water Management, 2015, 153: 20–31.
- [19] 刘维哲, 唐 溧, 王西琴, 等. 农业灌溉用水经济价值及其影响因素——基于剩余价值法和陕西关中地区农户调研数据[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 553–562.
- [20] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [22] CAO Xinchun, WU Mengyang, GUO Xiangping, et al. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 587–597.
- [23] MEISEL J E, TURNER M G. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis [J]. Landscape Ecology, 1998, 13(6): 347–362.
- [24] 马乐新, 杨永辉. 雄安新区上游农业用水经济效益评估[J]. 节水灌溉, 2021(9): 83–89.

(上接第 205 页)

- [9] 李 泽, 胡 政, 彭 普, 等. 基坑稳定性的塑性极限分析上限法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 230–236.
- [10] 郑 刚, 杜一鸣, 刁 钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599–612.
- [11] 李大鹏, 阎长虹, 张 帅. 深基坑开挖对周围环境影响研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(8): 659–668.
- [12] 王乾坤, 亢显卫, 朱 科. 地铁深基坑施工风险耦合评价方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(8): 1152–1158.
- [13] 张志红, 郭晏辰, 凡琪辉, 等. 悬挂式止水帷幕基坑降水引起坑外地面沉降计算方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(9): 1329–1334.
- [14] 郑 刚, 赵璟璋, 程雪松, 等. 多道撑深基坑支撑竖向连续破坏机理及控制研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(10): 1025–1038.
- [15] 冉启仁, 王 旭, 王博林, 等. 基坑开挖对邻近建筑桩基弯矩和变形影响的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 132–137.
- [16] ZHANG Xuemin, YANG Junsheng, ZHANG Yongxing, et al. Cause investigation of damages in existing building adjacent to foundation pit in construction[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 83: 117–124.
- [17] SONG Danqing, CHEN Zhuo, DONG Lihu. Monitoring analysis of influence of extra-large complex deep foundation pit on adjacent environment: A case study of Zhengzhou City, China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2036–2057.
- [18] 刘 波. 上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1950–1958.
- [19] WANG Jianxiu, WU Yuanbin, LIU Xiaotian, et al. Areal subsidence under pumping well – curtain interaction in subway foundation pit dewatering: Conceptual model and numerical simulations[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 198.
- [20] 叶帅华, 李德鹏. 复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S2): 117–126.
- [21] 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.
- [22] 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 + 1576.