

砂土区地铁车站深基坑盖挖逆作法 施工变形规律分析*

刘学明¹ 王国林¹ 孙东晓¹ 柳策² 张宁²

(1. 中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司, 201906, 上海; 2. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 110870, 沈阳)

摘要 [目的] 地铁车站盖挖逆作法施工过程中主体结构受力变形特征较为复杂, 而砂土地区地铁车站施工力学过程更为复杂, 致使砂土区基坑施工难度大大提升, 因此需对砂土区地铁车站深基坑盖挖逆作法施工变形特征进行深入研究。[方法] 依托沈阳某地铁车站工程, 对富水深厚砂层地质下的深基坑盖挖逆作法施工变形特性进行了阐述。采用数值模拟的方法, 详细分析了基坑施工过程中地下连续墙水平位移、层板位移、中立柱位移、地下连续墙与邻近中立柱差异沉降的变化规律。[结果及结论] 地下连续墙位移变形受基坑施工影响显著, 其水平位移变形随基坑开挖深度增加而不断变大, 均以向坑内的变形为主; 层板起到了很好的支撑作用, 有效控制了围护结构的水平位移, 主要呈现为隆起变形, 其中顶板受基坑施工的影响最大; 中立柱在竖向及水平方向上均发生变形, 受深基坑土体卸载效应影响, 主要以竖向的隆起变形为主; 地下连续墙及中立柱的差异沉降随施工进行逐渐增大, 在开挖底层土体时达到最大。

关键词 地铁车站; 深基坑; 盖挖逆作法; 砂土区; 结构变形

中图分类号 U231.4; TV551.4⁺2; U455.45

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.10.015

Deformation Law Analysis of Metro Station Deep Foundation Pit Constructed by Cover-Excavation Reverse Method in Sandy Area

LIU Xueming¹, WANG Guolin¹, SUN Dongxiao¹, LIU Ce², ZHANG Ning²

(1. Municipal Environmental Production Engineering Co., Ltd., of CREC Shanghai Group, 201906, Shanghai, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, 110870, Shenyang, China)

Abstract [Objective] Stress deformation characteristics of the main structure in the process of metro station construction by cover-excavation reverse method are relatively complex. The construction mechanics process of the subway station in the sandy area is even more complex, which greatly increases the

construction difficulty of the foundation pit in this area. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on the deformation characteristics of metro station deep foundation pit constructed by cover-excavation reverse method in sandy area.

[Method] Based on a metro station project in Shenyang City, the deformation characteristics of deep foundation pit cover excavation reverse construction in water-rich deep sandy stratum is elaborated. Numerical simulation is used to analyze the change law of diaphragm wall horizontal displacement, slab displacement, neutral pillar displacement and differential settlement between diaphragm wall and adjacent neutral pillar during foundation pit construction. [Result & Conclusion] The results show that the displacement deformation of diaphragm wall is significantly affected by the construction of the foundation pit, and its horizontal lateral displacement deformation increases continuously following the excavation depth of the foundation pit increase, with all deformation mainly towards the direction of the pit. The slabs play a good supporting role, effectively controlling the horizontal displacement of the enclosure structure, and manifesting mainly as heave deformation, among which the roof plate is most affected by the foundation pit construction. The neutral pillar is deformed in both vertical and horizontal directions, mainly in the form of vertical heave deformation due to soil unloading effect of the deep foundation pit. The differential settlement of the diaphragm wall and the neutral pillar increases gradually with the construction progress, and reaches the maximum in the excavation of the underlying soil.

Key words metro station; deep foundation pit; cover-excavation reverse method; sandy area; structural deformation

随着城市可利用空间有限性问题愈加突出, 车站建设规模越来越大, 开挖深度越来越深, 车站与建筑物间距越来越小, 因此在施工中需严格控制车站结构变形^[1-2]。环境敏感区域地铁车站进行建设

* 中铁上海工程局重点课题 (SH-2020-重点-20)

时,多采用盖挖逆作法施工,该方法结合了盖挖法和逆作法的特点,自 20 世纪 80 年代开始使用,近年来随着国内地铁大量兴建已有较多应用,已成为当下基坑施工变形研究的热点^[3]。

国内外大量学者针对盖挖逆作法基坑施工影响进行了一系列研究。文献[4]对地铁车站施工过程中结构变形情况及土压力分布形式进行了分析。文献[5-6]利用数值模拟方法对盖挖逆作基坑施工过程进行了计算,并分析了基坑施工对车站结构及周边环境的影响情况。文献[7]对盖挖逆作法基坑施工过程中邻近既有地下车站变形情况进行了模拟分析,结果表明,盖挖逆作法施工对邻近车站影响较小,其结构变形在控制范围内。文献[8]基于数值模拟方法对盖挖逆作施工中地连墙变形情况进行了分析,结果表明,层板施作可遏制地连墙侧移变形逐渐变大趋势,有效降低结构变形风险。

总体而言,由于地铁车站盖挖逆作法施工过程十分复杂,施工力学过程仍有待于进行深入讨论。本文以沈阳某地铁车站为工程背景,对盖挖逆作法基坑施工过程中地下连续墙、层板及中立柱等结构及差异沉降变形规律进行了分析,以为类似工程施工提供一定的指导。

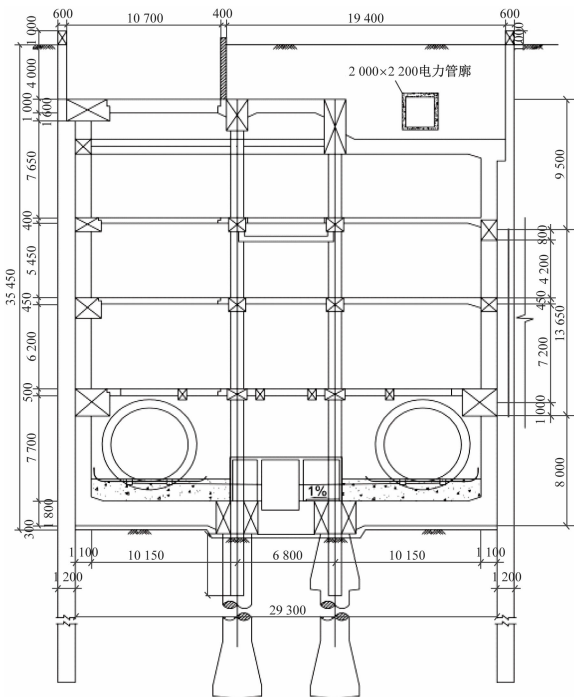
1 工程概况

1.1 工程简介

沈阳北站地铁站位于北站路及友好街丁字路口右侧,车站全长 148.4 m,主体结构标准段、盾构井段宽度分别为 25.3 m、29.3 m,车站标准段及盾构井段底板埋深分别为 33.55 m、35.45 m。围护结构采用 1.2 m 厚的地下连续墙,幅宽为 6.0 m。主体结构采用盖挖逆作法施工,利用顶板、中板及底板支撑,顶板下沉段厚 1.10 m,非下沉段厚 1.00 m,中板厚分别为 0.40 m、0.45 m、0.50 m,底板厚 1.80 m;中桩柱采用钢管柱+扩底桩形式,非下沉段采用单扩底桩,下沉段采用双扩底桩,单双扩底桩各 18 根。基坑共设 4 个出土进料口,均在主体结构右边跨范围。地铁车站端头剖面图如图 1 所示。

1.2 地质水文条件

车站内部地质情况自上而下分别为:① 杂填土(Q4ml);④ 中粗砂(Q42al);④ 砾砂(Q42al);④ 圆砾(Q42al);⑤ 粉质黏土(Q32al+pl),该层为薄夹层且不连续分布;⑤ 中粗砂(Q32al+pl);⑤ 砾砂(Q32al+pl);⑤ 圆砾(Q32al+pl);⑦ 泥砾



注:单位为 mm。

图 1 地铁车站端头位置剖面图

Fig. 1 Cross-section of subway station end position

(Q1gl)。地下水类型为第四系孔隙潜水,稳定水位埋深为 16.50~17.00 m,地下 36 m 处为隔水层,地下连续墙为止水帷幕,采用管井降水方法,基坑内部进行疏干降水,基坑外侧采取泄压降水。

2 数值计算模型建立

2.1 土体本构模型及参数

运用有限元软件对车站基坑开挖进行模拟,选用修正摩尔-库伦模型进行土体单元模拟,地下连续墙、层板、冠梁等采用线弹性模型,钢管柱采用梁单元来进行模拟,钢管柱横向间距为 6.8 m,纵向间距为 6.0 m。各层土体参数如表 1 所示。

2.2 有限元计算模型建立

考虑开挖产生影响范围,模型边界范围在水平和竖向上分别为 $3H \sim 5H$ (H 为基坑开挖深度) 和 $2H \sim 4H$ 。综上,三维模型尺寸为 350 mm(长) × 240 mm(宽) × 65 mm(高)。基坑三维整体模型如图 2 所示。基坑施工过程中主要荷载包括各个土层重力、支护结构重力,模型的边界均为位移边界条件,其中模型顶部面为自由面(地面),不施加任何约束条件;模型侧边界在 x 、 y 方向上施加约束,竖向自由;模型底部为固定端,在 x 、 y 、 z 方向全部施加约束。

表 1 各层土体参数
Tab.1 Soil parameters of each layer

土层	重度/ (kN/m ³)	切线模量/ MPa	压缩切线 模量/MPa	卸载再加载 模量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
杂填土	16.8	8.0	8.0	32	8	20.0	0.30
中粗砂	19.5	23.0	23.0	92	2	35.0	0.28
砾砂	19.8	27.0	27.0	108	2	35.9	0.29
圆砾	20.3	24.0	24.0	96	3	36.0	0.30
中粗砂	19.8	27.0	27.0	108	2	35.9	0.28
砾砂	20.1	26.5	26.5	106	2	36.7	0.29
圆砾	20.4	26.0	26.0	104	2	36.5	0.30
泥砾	20.2	40.0	40.0	160	7	36.7	0.29

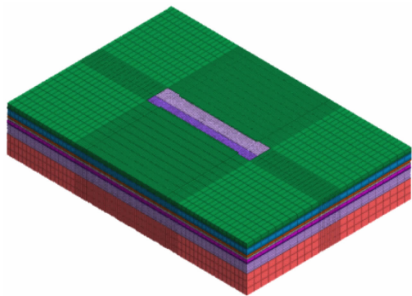


图 2 三维基坑开挖模型图

Fig. 2 Diagram of three-dimensional foundation pit excavation model

2.3 施工工况模拟

地铁车站深基坑盖挖逆作法开挖施工过程中的主要工况流程如图 3 所示。

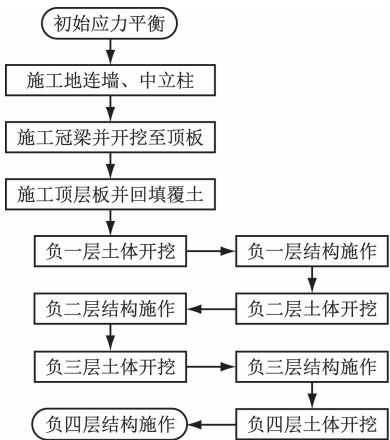


图 3 施工工况流程图

Fig. 3 Flow chart of construction conditions

3 盖挖逆作法基坑施工变形规律分析

基坑结构变形研究是盖挖逆作法基坑施工过

程中重要研究内容,分析其结构的变形趋势,确定结构最大变形位置可以使施工单位提前对风险区域采取防护措施;对可能出现的风险情况进行预判,可大大降低盖挖逆作法施工风险,保证施工顺利进行。在盖挖逆作施工方法条件下,基坑施工变形的研究方法主要有数值模拟和实测分析两种。本文主要利用数值模拟方法对盖挖逆作法施工引起地下连续墙、层板、中立柱的变形规律及墙柱差异沉降情况进行了研究。

3.1 地下连续墙侧移变形分析

基坑施工过程中,由于土体开挖卸载,地下连续墙受到外部土压力作用产生向基坑内部的位移。现取右侧地下连续墙为研究对象,对不同工况下的地下连续墙侧移变形情况进行研究。地连墙位移曲线如图 4 所示。

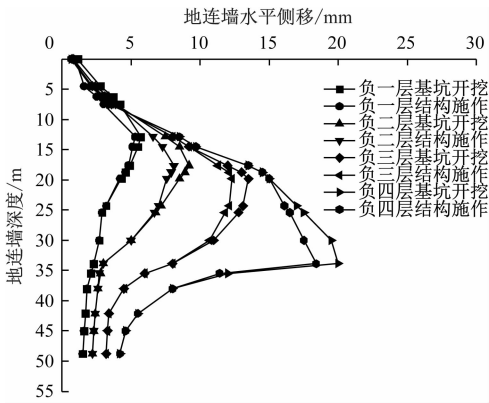


图 4 不同工况下地连墙变形曲线图

Fig. 4 Deformation curves of the diaphragm wall under different working conditions

由图 4 可以看出,盖挖逆作法基坑开挖施工过程中地连墙侧移变形呈现出以下规律:

1) 各开挖阶段地连墙的最大侧移量及最大变形位置随施工的进行分别呈现出变大和下降的趋势;在各层开挖过程中地连墙的最大侧移变形分别为 5.7 mm、9.2 mm、13.5 mm、20.0 mm。其中,在开挖第 4 层时其侧移量增加最大,达到 6.5 mm,大于其他层开挖时的侧移增量;其主要原因是第 4 层层高达到 8.45 m,远大于其余三层,土方开挖后地连墙承受更大的水、土压力,因此侧移变形会更大。

2) 在各层结构施作后地连墙的最大侧移变形量有所降低,其最大侧移量分别降至 5.3 mm、8.1 mm、12.3 mm、18.4 mm。这表明层板结构的施作起到了很好的支撑作用,有效抑制了地连墙侧移变形不断增大的趋势。其中,负四层结构施作后其侧移减小量最大,达到了 1.6 mm,分析其主要原因是负四层结构施工中底板厚达 1.8 m,底板施作后由于其较大的刚度,可以起到较强的支撑作用,控制变形作用更明显,因此该层地连墙最大侧移量降低最明显。

3) 地连墙的水平侧移曲线变化趋势为先增大后减小,总体呈“两端小,中间大”形状。通过分析,出现该现象的原因主要为:顶板的施作形成了基坑的局部支撑结构,进一步抑制了地连墙顶部的位移变形,故墙顶的最大位移仅为 1.2 mm;底板对变形控制作用较大且地连墙下端深埋于土层中,坑底土也起到了一定的支撑作用,导致地连墙底端部分的侧移变形呈现出逐渐减小趋势。

3.2 层板变形分析

层板作为盖挖逆作法施工过程中特有结构,在控制基坑变形、减小基坑二次变形等方面有着重要作用,其最大优势在于顶板施作完成后可以恢复地面交通,极大减小施工对城市密集区域交通影响。虽然层板结构具有一定优势,但在基坑施工过程中,受施工阶段影响层板会产生一定的变形,如果变形较大,会对结构安全性和稳定性产生一定影响。

基于上述情况,以基坑短边方向的层板为研究对象,对各层层板在负四层基坑开挖和结构施作下的变形情况及不同施工工况对顶板的变形情况进行了研究,分别如图 5、图 6 所示。

由图 5 可以看出:基坑施工过程中各层顶板总体上呈现为隆起变形趋势,结构的施作可以有效起到控制层板变形的作用。其中在负四层基坑开挖过程中引起各层板最大变形分别为 7.99 mm、6.64 mm、5.33 mm、3.50 mm,均位于层板中间位置即位

置 3;有关数据表明,负四层基坑开挖对负一层顶板的变形影响最大。负四层结构施作后,各层板变形分别为 7.79 mm、6.39 mm、5.03 mm、3.06 mm,较开挖引起的最大变形量分别降低 0.20 mm、0.25 mm、0.30 mm、0.44 mm,其数据表明负四层结构施作后,对负四层顶板的变形控制效果最明显。

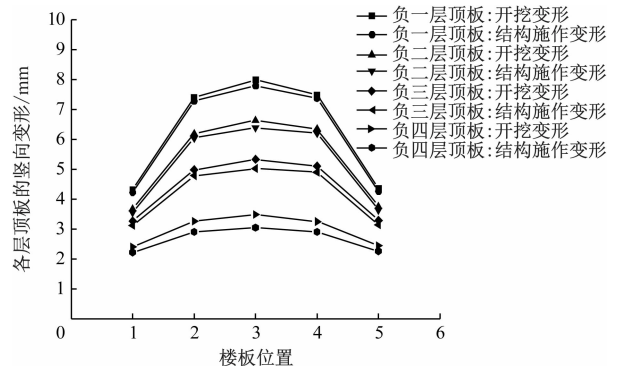


图 5 负四层基坑开挖及结构施作对层板变形影响

Fig. 5 Effects of the negative four-layer foundation pit excavation and construction on slab deformation

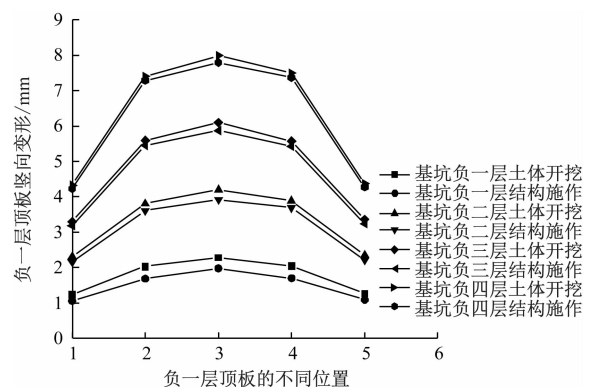


图 6 不同施工工况对顶板变形影响

Fig. 6 Effects of different construction conditions on roof deformation

由图 6 可以看出:各施工工况下顶板的变形均呈现出两边小、中间大的隆起变形趋势,且均为位置 3 即层板中间位置的变形最大,位置 1、5 即层板边缘变形较小。其中,负 1—负 4 层开挖引起的顶板的最大变形分别为 2.28 mm、4.20 mm、6.10 mm、7.99 mm,负 1—负 4 层结构施作后顶板的最大变形分别为 1.98 mm、3.92 mm、5.87 mm、7.79 mm,较开挖引起的顶板最大变形分别降低了 0.30 mm、0.28 mm、0.23 mm、0.20 mm,上述数据表明负四层开挖引起顶板的变形最大,负一层结构施作对顶板的变形控制效果最明显。

3.3 中立柱变形分析

中立柱作为盖挖逆作法基坑工程中的主要受力结构,结构变形与施工阶段密切相关。在施工过程中,中立柱不但会发生水平侧移变形,而且也会发生较大竖向位移;尤其在竖向变形过程中受施工阶段影响会发生反复的回弹上升及沉降变形,变形情况复杂,对基坑稳定性和安全性会产生较大影响。

为此,以基坑中变形最大的中立柱为研究对象,对盖挖逆作法基坑不同施工阶段下中立柱竖向及水平位移变形情况进行了研究,如图 7 所示。

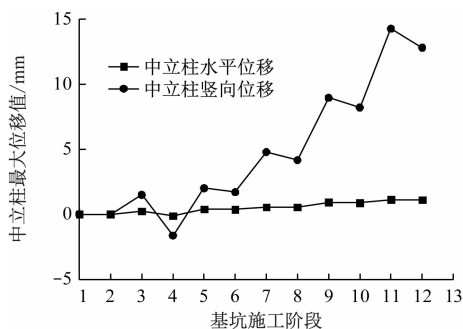


图 7 不同施工阶段中立柱竖向及水平位移变形情况

Fig. 7 Vertical and horizontal displacement and deformation of neutral pillars at different construction stages

1) 由图 7 可以看出,基坑盖挖逆作施工过程中,中立柱在水平向及竖向均会发生一定的变形,其中竖向变形远远大于水平向变形,竖向变形主要呈现为隆起变形,水平向变形呈现出指向基坑内部趋势。其中在地下四层土体开挖时隆起变形达到最大,为 14.26 mm,此时的水平向变形为 1.12 mm,地下四层结构施作完成后,中立柱变形趋势得到控制,此时隆起变形达到 12.80 mm,水平向变形为 1.09 mm。

2) 图 7 中的 3、4 阶段分别为开挖至顶板及覆土回填过程,在 3、4 两个施工阶段中立柱的竖向变形发生一定的回弹反复,开挖覆土导致了中立柱隆起变形,回填覆土后又发生沉降变形。5、7、9、11 阶段分别为基坑各层的开挖过程,在这 4 个阶段中,中立柱的竖向变形均随着施工的进行而不断变大;6、8、10、12 阶段分别为结构施作过程,结构施作后,中立柱隆起变形有所降低,竖向变形发生一定反复。在阶段 12 变形降低效应最明显,主要原因是该阶段进行了底板施作,底板厚 1.8 m,刚度较大,使中立柱竖向变形不断增大趋势得到了遏制。

3.4 中立柱及地连墙差异沉降分析

受土体开挖卸荷影响,基坑周围及底部土体会产生回弹,致使地下连续墙在竖向上发生一定变形,且中间立柱要承受上覆土压力、上部结构和自身重力等荷载的作用,也会在竖向上发生一定的变形,在这个过程中墙柱之间会产生差异变形,差异变形会引起地下结构的内力重分布,危及地下结构安全。

基于上述情况,以基坑短边方向横截面的两边地连墙及中立柱的同一高度处为研究对象,从左到右将两侧地连墙及中立柱分别定义为墙 1、柱 2、柱 3、墙 4。基坑盖挖逆作施工完成后墙柱的竖向位移及差异沉降分别如图 8、图 9 所示。

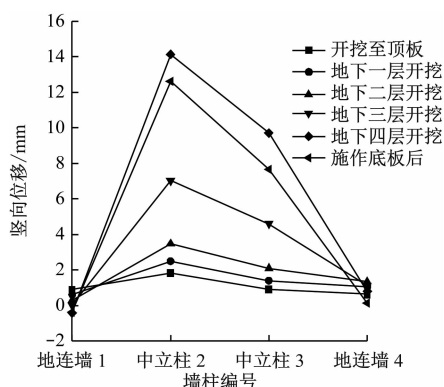


图 8 墙和柱竖向变形

Fig. 8 Vertical deformation of walls and neutral pillars

由图 8 可以看出:地下连续墙在竖向上的位移较小,最终墙 1 发生沉降变形,沉降量为 0.36 mm,墙 4 则为隆起变形,隆起量为 0.15 mm。底板施作后中立柱变形有所减小,柱 2 隆起值为 12.61 mm,柱 3 为 7.66 mm,造成柱 2、3 差异较大原因主要为两侧覆土厚度不同,且柱 3 为双扩底柱,底板施作可有效降低双扩底柱的隆起变形。

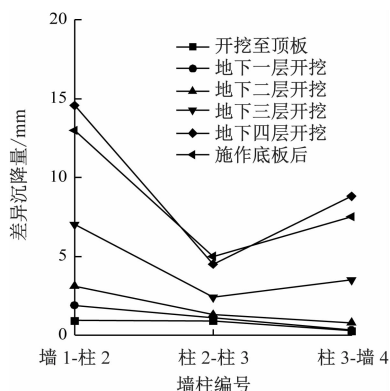


图 9 差异沉降

Fig. 9 Differential settlement

由图9可知:墙1-柱2与柱3-墙4两处的差异沉降远大于柱2-柱3,且随着施工的不断进行,墙柱的差异沉降变化得较为明显,在底板施作后差异沉降的增长趋势得到了遏制,墙1-柱2之间差异沉降最大,达到了14.55 mm。中立柱之间的差异沉降随着开挖深度的增加也呈现出逐渐增大的趋势,受中立柱两侧覆土厚度及构造影响,在底板施作后相邻中立柱的差异变形达到最大。根据施工经验,地下结构中相邻中立柱之间以及中立柱和地连墙之间的沉降差值不能超过20.00 mm,最不利工况下的最大差异沉降为14.55 mm,符合安全要求。

4 结论

本文通过模拟基坑盖挖逆作施工过程,分析了施工过程中地下连续墙、层板、中立柱等结构变形规律,同时考虑了开挖对地下连续墙与中立柱、邻近中立柱之间差异变形影响。主要得到以下结论:

1) 地下连续墙水平侧移受时间效应影响显著,侧移变形及变形最大值位置由基坑开挖深度决定。水平侧移变形随着施工进行不断增大,在层板等支撑结构施作后,水平侧移变小,主要以指向坑内侧移变形为主,呈现出两端小、中间大的变形特点。

2) 在基坑开挖施工过程中,层板距开挖面越远,其隆起变形量越大;在结构施作过程中,层板距结构施作层越近,变形控制效果越明显,其变形量越小。同时受两侧地连墙的挤压,层板主要呈现出两侧小、中间大的隆起变形,地下四层土体开挖时,顶板的隆起变形达到最大。

3) 中立柱受开挖影响产生以竖向位移为主的变形,且具有明显时间效应,即开挖时中立柱发生隆起变形,结构施作时发生一定沉降,最终呈现为向上隆起变形。施工过程中地下连续墙与中立柱及邻近中立柱之间会产生一定差异沉降,墙柱之间差异沉降受施工影响较为明显,且随着施工进行而不断增大,其中左侧墙柱之间差异沉降大于右侧,但差异沉降均小于规范要求20 mm,满足施工要求。

4) 建议盖挖逆作基坑覆土回填过程中,需对土体进行致密,以保证恢复通行路面的安全。同时在基坑地下四层开挖完成后,尽快施作底板及侧墙等结构,并加强对混凝土养护,使其尽早形成底部支撑结构,确保基坑施工安全。

参考文献

- [1] 姜宝臣,李现森.复杂敏感环境下的深大基坑设计与实践[J].隧道建设,2017,37(5):600.
JIANG Baochen, LI Xiansen. Design and practice of deep and large-scale foundation pit in complex and sensitive environment [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 600.
- [2] YANG J, KONG D. Deformation of deep and large foundation pit in soft soil of Fuzhou Subway [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(1): 16.
- [3] 任建喜,王东星,王江,等.全盖挖法地铁车站基坑及周边变形规律研究[J].铁道工程学报,2016,33(5):82.
REN Jianxi, WANG Dongxing, WANG Jiang, et al. The deformation law of deep foundation pit and surroundings of subway station for using full cover construction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(5): 82.
- [4] 郑刚,刘庆晨,邓旭,等.天津站地下换乘中心基坑工程2标段盖挖逆作法的实测分析[J].天津大学学报,2012,45(10):8.
ZHENG Gang, LIU Qingchen, DENG Xu, et al. Analysis on monitoring of top-down method of section 2 of tianjin railway station underground transfer centre [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(10): 8.
- [5] 白冰.地下人防工程盖挖逆作法施工过程模拟及风险控制技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
BAI Bing. Research on construction process simulation and risk control technology of covering and digging reverse construction method for underground civil project [D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [6] 张振义,陈雾航,许有俊,等.基于AM桩盖挖逆作地铁车站施工力学有限元分析[J].隧道建设,2020,40(2):189.
ZHANG Zhenyi, CHEN Wuhang, XU Youjun, et al. Finite element mechanical analysis of metro station constructed by cut and cover top-down method based on am pile [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 189.
- [7] 董发俊,胡安奎,张社荣,等.新建车站盖挖逆作法施工对既有车站的变形影响分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(6):119.
DONG Fajun, HU Ankui, ZHANG Sherong, et al. Influence of newly built metro station with up-down construction method on the displacement of existing stations [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 119.
- [8] ZHANG J. Finite element analysis of ultra-deep foundation pit covered top-down excavation based on PLAXIS [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300(2): 022158.

· 收稿日期:2022-06-12 修回日期:2022-10-14 出版日期:2024-10-10

Received:2022-06-12 Revised:2022-10-14 Published:2024-10-10

· 通信作者:刘学明,高级工程师,2395099700@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license