

天津某半逆作法基坑结构柱隆起变形实测分析

夏曾银¹, 郑刚², 邓旭³, 冀叶涛¹, 程雪松², 孟灵波¹

(1. 中铁隧道局集团路桥工程有限公司, 天津 300308; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350;
3. 天津城建大学 建筑设计研究院有限公司, 天津 300192)

摘要: 半逆作法基坑施工可以综合明挖顺作法与盖挖逆作法的各自优势, 节约造价且便于施工。天津某交通枢纽广场基坑采用环形盖挖逆作、中心明挖顺作的半逆作法施工, 通过对结构柱隆沉变化实测数据进行分析研究表明, 结构柱的竖向变形基本表现为开挖阶段隆起现象显著, 层板施工阶段隆起稳定甚至发生轻微沉降。当基坑开挖深度较浅时, 结构柱的隆起变形量相对较小, 随着开挖深度增加隆起量急剧增大。半逆作法基坑的结构柱的最终隆起量为 $(0.19\% \sim 0.35\%)D$ (D 为基坑开挖深度), 数值更接近于顺作法基坑, 明显大于盖挖逆作法施工的基坑, 这对地下结构安全性的影响也更加严重。在此基础上提出设计施工中的一些注意事项, 为今后类似工程的建设提供参考。

关键词: 基坑; 半逆作法; 结构柱; 隆起变形; 监测

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0657-08

Analysis on heave deformation of columns for excavation with semi top-down method in Tianjin

XIA Zengyin¹, ZHENG Gang², DENG Xu³, JI Yetao¹, CHENG Xuesong², MENG Lingbo¹

(1. China Railway Tunnel Group Road & Bridge Engineering Co., Ltd., Tianjin 300308, China

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

3. Tianjin Chengjian University Institute of Architectural Design Co., Ltd, Tianjin, 300192)

Abstract: The construction of excavation with semi top-down method can integrate the respective advantages of bottom-up method and top-down method, save the cost and facilitate the construction. The excavation of one transport hub square in Tianjin is constructed by the semi top-down method with the top-down method in the periphery and the bottom-up method in the central part. Through the analysis of the monitoring data of columns heave and settlement, the vertical deformation of columns shows that the heave phenomenon is significant in the excavation stage, and stable or even slight settlement in the laminate construction stage. When the depth of the excavation is shallow, the heave of the column is relatively small, and the heave increases sharply with the increase of the excavation depth. The final heave of the columns of the excavation with the semi top-down method is $(.19\% \sim 0.35\%) D$ (D is the depth of excavation), which is closer to the bottom-up method excavation and significantly greater than the top-down method excavation. And the heave of the columns has a more serious impact on the safety of the underground structure. On this basis, some precautions in design and construction are put forward, which can provide reference for the construction of similar projects in the future.

Key words: excavation; semi top-down method; columns; heave; monitoring data

目前基坑开挖深度越来越大, 特别是在软土地区基坑深度可达 20~30 m、甚至 30 m 以上。在这种极强的卸荷作用下, 坑底发生隆起、支护墙体在内外土压力差作用下产生侧移, 进而导致基坑周围地基土体的变形^[1-2]。不少专家学者都对基坑支护引起的变形规律进行了研究分析, 其中基

坑回弹变形是关注的问题之一^[3-7]。据统计, 因深基坑土方开挖而引起的坑底隆起变形可达数厘米甚至超过 10 cm^[8-9], 如此大变形量对于基坑的稳定性、围护结构的内力及变形、坑外地面沉降以及对邻近建筑物、道路和地下管线所引起的工程效应不能忽略^[10-11], 尤其是对基坑内工程桩及新

收稿日期: 2021-11-06

修改稿日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(52178343)

第一作者: 夏曾银(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通、市政工程的管理与科研工作, E-mail: xcy79@163.com

通信作者: 邓旭(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基坑支护等岩土工程设计与科研工作, E-mail: 389510511@qq.com

建地下结构可能产生不利影响,需要对基坑进行精细化设计及施工,有时必须要采取辅助措施加以控制^[12-13]。

目前对基坑回弹问题的研究主要针对的是正常顺序开挖的基坑,即土方开挖至基底后再向上施工地下结构。上海是研究基坑坑底变形最早的地区,基于高层建筑箱形基础的基底回弹实测资料,早在20世纪70年代就提出了该地区软土深基坑开挖最大回弹量一般约为 $(0.5\% \sim 1.0\%)D$ (D 为基坑开挖深度)。之后刘国彬^[14]由残余应力法计算出上海地铁2号线杨高路站14.2 m深的基坑回弹估算值为109.7 mm ($0.77\% D$),而实测值为78.8 mm ($0.56\% D$);徐彪、刘佳^[15]基于分层总和法,采用土体卸荷模量参数,计算出上海某7.6 m深的基坑回弹量为44 mm ($0.58\% D$),而实测值为53.1 mm ($0.70\% D$);陆培毅等^[16]根据有限元计算出12 m深的基坑最大回弹量为91.5~96.3 mm (约为 $0.76\% D$);宰金珉^[17]总结了京沪6幢高层建筑基坑回弹量,得出对于顺作法基坑回弹量上海地区可用 $(0.5\% \sim 1.0\%)D$ 来估算,北京地区基本在 $(0.15\% \sim 1.0\%)D$ 之间。

对于主体工程建设或环境条件有特殊要求的基坑工程,宜采用主体地下结构的梁板作为围护结构的内支撑、支护结构的围护墙与主体地下室的外墙相结合的盖挖逆作法施工。刘毅等^[18]通过某地铁车站基坑实测得出,盖挖逆作施工支护结构水平变形较小,且卸荷效应也比全明挖顺作工作方式更弱。由于逆作法从地面开始,竖向桩柱始终连为一体,其上又被水平结构梁板约束,因此,基底土体的隆起始终受到柱、桩的制约,隆起量必然比顺作法的基坑更小。因此,对逆作法工程,基坑回弹量并非主要问题,而更应考虑的是竖向立柱桩之间及立柱桩与围护墙之间的差异沉降。郑刚^[19-20]对天津站地下换乘中心基坑工程1、2标段盖挖逆作基坑的主体结构柱隆沉变化进行监测,结构柱最终隆起量为 $(0.07\% \sim 0.16\%)D$,结构柱隆起变化表现为中部最大,距离地下连续墙越近隆起量越小,具有明显的时空效应。

基坑施工方式除了上述提到的顺作法及逆作法外,还包括将明挖顺作与盖挖逆作相结合的半逆作施工方法,即基坑围护结构周边若干跨区域利用地下结构梁板作为内支撑,由上至下进行地下结构施工,待开挖至坑底后,基坑中心区域再由下至上施作剩余地下结构。该方法可以充分利用地下结构梁板作为内支撑系统,有效控制围护

结构变形,节省临时支撑的费用,同时还可以将中心的顺作区域作为出土通道,避免了盖挖逆作法出土困难的缺陷,提高施工效率。但目前针对这种施工方法的基坑监测成果较少,尤其是对于基坑隆起变形以及引起的结构柱隆沉变化规律,缺乏相应的研究。

天津某交通枢纽广场工程采用上述介绍的环形盖挖逆作、中心明挖顺作的半逆作方法进行施工。本文通过对该工程施工过程中主体结构柱隆沉变化的监测成果进行整理分析总结,得到软土地区深基坑半逆作施工中结构柱的变形规律和设计施工注意事项,为今后类似工程的建设提供参考。

1 工程概况

1.1 基坑概况及周边环境

天津某交通枢纽广场位于火车站主站房西侧广场三角区域范围内,主要作为联系前、后广场的旅客集散大厅以及出租车和社会车辆停车使用。主体为地下两层框架结构、中心区域局部地下三层,地下二、三层基础底板标高相同。工程占地面积约17 213 m²,总建筑面积约39 047 m²。本工程基坑平面呈东南缺角的矩形分布,东西向边长96~196 m,南北向边长50~108 m,普遍区域基坑深度约14.8 m,局部集水坑处深度约17 m。

本工程基坑北侧为现有车站行包房,行包房共7层,距基坑边的最近距离约为21 m;东侧为现状火车站,火车站共6层,距基坑边的最近距离约为11.6 m;西侧为1~2层的低矮楼房区,距基坑边的最近距离约10 m;南侧为某大厦,大厦共6层,距基坑边的最近距离约15 m。本工程建设时天津地铁3号线盾构区间尚未施工,待本工程施工完成后在东侧底板下穿越,隧道顶部距离底板约11 m。本项目工程平面及周边环境如图1所示,基坑支护平面布置如图2所示。

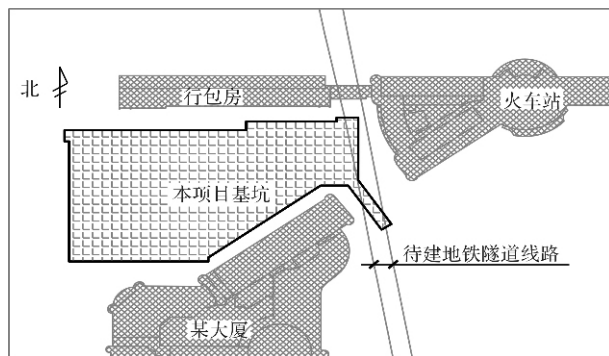


图1 基坑周边环境示意图

Fig. 1 Plan view of surrounding environment

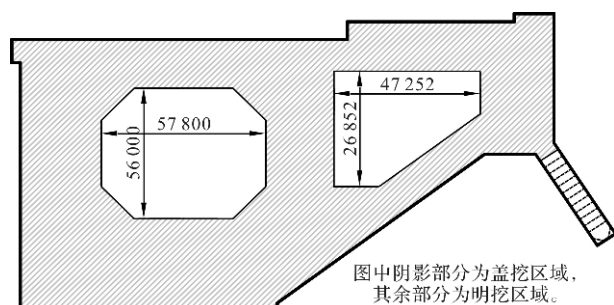


图2 基坑支护平面示意图

Fig. 2 Plan view of excavation support

1.2 工程地质与水文地质条件

本项目场地地处冲积平原,地形平坦,场地类别为Ⅲ类,场地土类型为软弱~中软场地土。地表以下60 m深度范围内,分布的土层主要为杂填土、素填土、淤泥质黏土、粉质黏土、粉土、黏土及粉砂、细砂。

影响本工程的地下水主要为潜水和第一微承压水。潜水层水位埋深3.70~3.81 m,主要赋存于人工填土层 Q_{ml} 、新近沉积层 Q_{Nsi}^{3N} 、第Ⅰ陆相层 Q_{al}^3 和第Ⅰ海相层 Q_{4m}^2 中,以第Ⅱ陆相层 Q_{4h}^1 的粉质粘土层及粘土层作为隔水底板。第一微承压水层水位埋深21.01~22.10 m,主要赋存于第Ⅲ陆相层 Q_{al}^3 、第Ⅳ陆相层 Q_{al}^3 中的粉土、粉砂层中,以第Ⅱ陆相层 Q_{4h}^1 的粉质粘土层和粘土层作为隔水顶板。

1.3 施工顺序

本工程基坑采用环形盖挖逆作、中心明挖顺作的半逆作方法进行施工。其思路是首先施工基坑围护桩(墙),浇注地下结构边跨以及若干相邻跨的梁、板,从而形成环形支撑体系以控制基坑变形,在此基础上进行下方的土方开挖,并由此依上而下施作周边盖挖区域的主体结构,待开挖至坑底后再由下而上依次施作中间明挖区域剩余的主体结构,最后回填土方并恢复地面。具体施工步骤如下:

(1)施作围护结构桩(墙)及中间桩、柱;

(2)进行坑内降水,在围护结构的悬臂支护下开挖土方至顶板底标高,浇注盖挖范围的顶板结构,使顶板与中间桩柱形成第一道支撑系统;

(3)在第一道内支撑系统保护下,开挖土方至楼板底标高,浇注盖挖范围的楼板结构及地下一层侧墙,使楼板与中间桩柱形成第二道支撑系统;

(4)在第二道内支撑系统保护下,开挖土方至设计坑底标高,浇注盖挖范围的底板结构及地下

二层侧墙;

(5)由下而上依次浇注中间明挖区域的底板、楼板和顶板以及夹层主体结构;

(6)封闭降水井,回填土方,恢复路面。

2 施工监测布置

结合本工程基坑平面形状、深度、支护形式及周边环境特点,根据相关规范要求,对工程影响范围内的监测项目在基坑全施工过程中进行了系统的监测。主要监测项目包括围护结构桩顶及桩身水平位移、桩顶沉降、坑外土体水平位移、横撑内力、混凝土支撑应变、周边建筑物沉降、地表沉降、地下管线沉降、地下水位监测、坑外土体分层沉降、盖板沉降、结构柱沉降和主体结构变形监测等。

基坑开挖引起的坑底土体卸荷作用将会导致坑内工程桩产生不同程度的上浮。对于顺作法基坑,由于地下结构主体待基坑开挖至坑底后方可施作,此时基坑隆起已经基本完成,因此除对工程桩外,基坑隆起对地下主体结构产生的影响不大。但是盖挖逆作施工的基坑,地下结构主体施作与基坑土方开挖是交替进行的,因此主体结构的内力及变形受基坑隆起的影响更加显著。

为研究基坑开挖对地下结构的影响,本工程共布设15个结构柱隆沉监测点(以Z编号),主要位于基坑内盖挖区与明挖区交界处的地下主体结构柱位置;并布设35个盖板隆沉监测点(以G编号),主要位于与明挖区域相邻的盖挖区域内。监测点的平面布置见图3所示。

3 监测结果分析

3.1 盖板及结构柱隆沉时程分析

本工程共布设35个盖板隆沉监测点,监测点G1~G13、G14~G15、G16~G22、G23~G35的初值采集时间分别为第20周初、第27周初、第28周初、第29周初,自初值采集到本工程地下结构全部施作完成期间,各监测点的监测频率均为每日一次,将部分盖板监测点隆沉量的时程曲线绘制于图4中。

共布设15个结构柱隆沉监测点,初值采集时间均为第20周初,初值采集到本工程地下结构全部施作完成期间,各监测点的监测频率均为每日一次,将部分结构柱监测点隆沉量的时程曲线绘制于图5中。

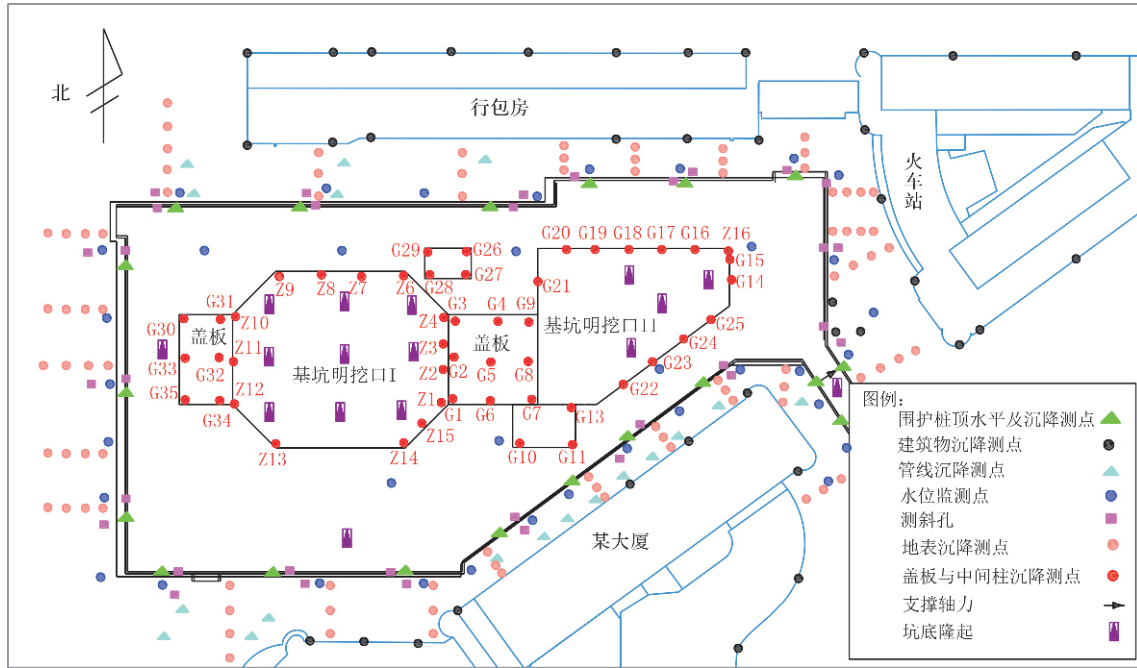


图3 基坑监测点平面布置图

Fig.3 Plan view of excavation monitoring

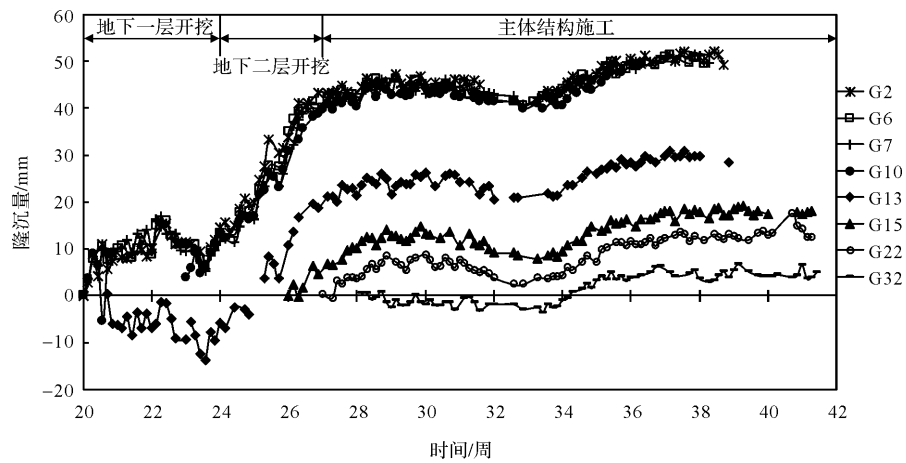
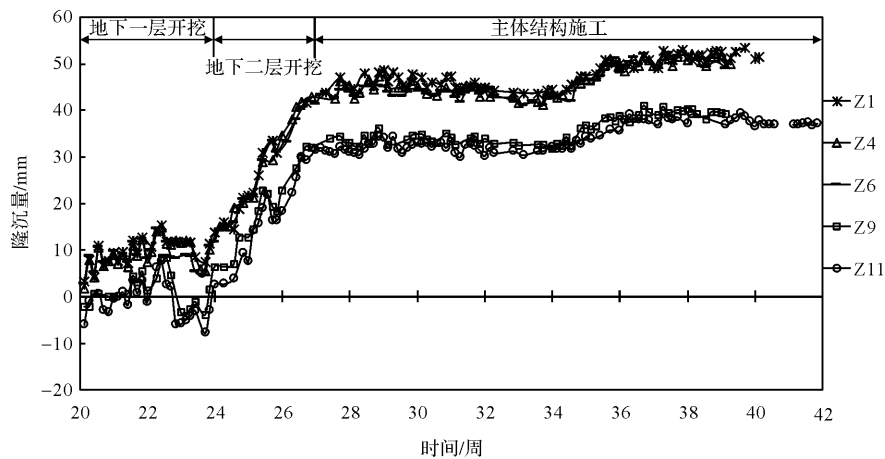
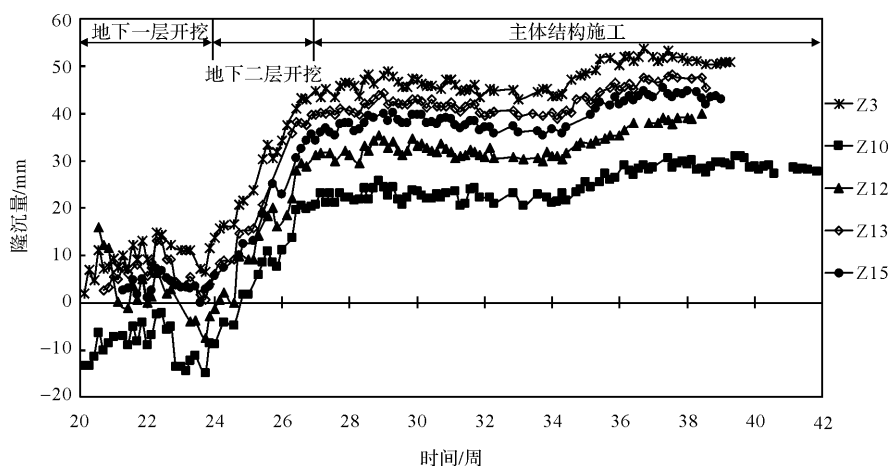


图4 盖板隆沉量时程曲线

Fig.4 Heave vs time for plates



(a) Z1、Z4、Z6、Z9、Z11监测点



(b) Z3、Z10、Z12、Z13、Z15监测点

图5 结构柱隆沉量时程曲线

Fig. 5 Heave vs time for columns

本工程地下一层开挖时间为第20周~第24周,地下二层开挖时间为第24周~第27周,此后的四个月时间主要进行地下主体结构的施工。

从盖板及结构柱监测点的时程曲线中可以发现,随着基坑施工的进行,盖板及结构柱整体表现为隆起变形的趋势,仅有个别监测点在施工初期略产生沉降现象。

图4为结构盖板隆沉量随时间变化曲线,从图中可以看出盖板隆沉变化根据施工进度表现出如下规律:

(1)地下一层开挖期间,受卸荷作用影响,大部分盖板监测点均产生一定的隆起变形,但是隆起量较小且在地下一层施工期间变化不大,甚至在地下一层施工后期产生了轻微下沉现象。推测这主要是由于地下一层开挖深度相对较浅,卸荷作用较小,且盖挖区域地下一层的梁板柱已施作完成、结构整体性加强,导致盖板及结构柱的隆起变形量并不明显。地下一层施工后期受到地下二层预降水、楼板施工、土方运输堆放等施工影响,个别点甚至会产生一定的沉降;

(2)地下二层开挖期间,基坑开挖深度增加引起土体卸荷作用增强,导致各监测点隆起量均急剧增大,直至地下二层土方开挖完成、地下主体结构开始施作,监测点的隆起量方基本稳定,其后至地下主体结构全部施作完成,各监测点的隆起量变化并不大。

对比各监测点的隆起曲线可以发现,G2、G6、G7及G10监测点相比其他点变形量较大,且曲线规律一致,从图3监测点布置图中看这些点基本位

于基坑中心区域,受基坑隆起的影响更强烈,G13监测点后期规律与前述监测点相同,只是由于局部施工原因前期产生一定沉降,导致变形整体相对较小,而G15、G22及G32监测点由于初值采集较晚,使其数据不完整且数值相比其他监测点明显偏小。

图5为结构柱隆沉量随时间变化曲线,其隆沉的变化规律与结构盖板基本一致,均表现为地下一层开挖期间结构柱隆起量较小,地下二层开挖期间隆起量迅速增加,而在后期主体结构施工期间隆起变形基本稳定。对比各监测点变形曲线,图5(a)中Z1、Z4及Z6点位置更靠近基坑中部,变形量较大且趋势相近,而Z9及Z11点位置接近均位于基坑西北角部,基坑隆起受空间效应影响相对较小,导致该点变形量也比前述点明显减小;图5(b)中也呈现同样规律,位于基坑中心处监测点隆起更大、边角部的隆起相对较小。

通过上述对监测点时程曲线的分析可知,对于盖挖法施工的工程,由于地下结构的整体性较强,在浅部土体开挖阶段,结构隆起变形并不明显;随着开挖深度逐渐增大,隆起将呈现出急剧增大的趋势。此时对于结构的安全更加不利,在施工时需加强监测,必要时辅以分块、抽条开挖等有效措施减缓基坑隆起的发展。由于基坑卸荷回弹受空间效应的影响有所差异,导致基坑中心位置处结构的隆起量更大,而靠近边角部位的隆起量相对较小。

天津站地下换乘中心基坑工程1、2标段的监

测也有类似的结构柱隆沉变化规律^[19-20]。天津站地下换乘中心基坑工程1、2标段位于天津站后广场。该项目基坑1标段为地下三层结构,2标段为地下三层、局部地下四层结构,地下三层基坑深度25~28 m,地下四层最大挖深可达33.5 m。基

坑采用主体结构与支护结构全面结合的完全盖挖逆作法施工,基坑施工期间对结构柱隆沉进行了持续监测,得到的监测点隆沉时程曲线如图6所示。

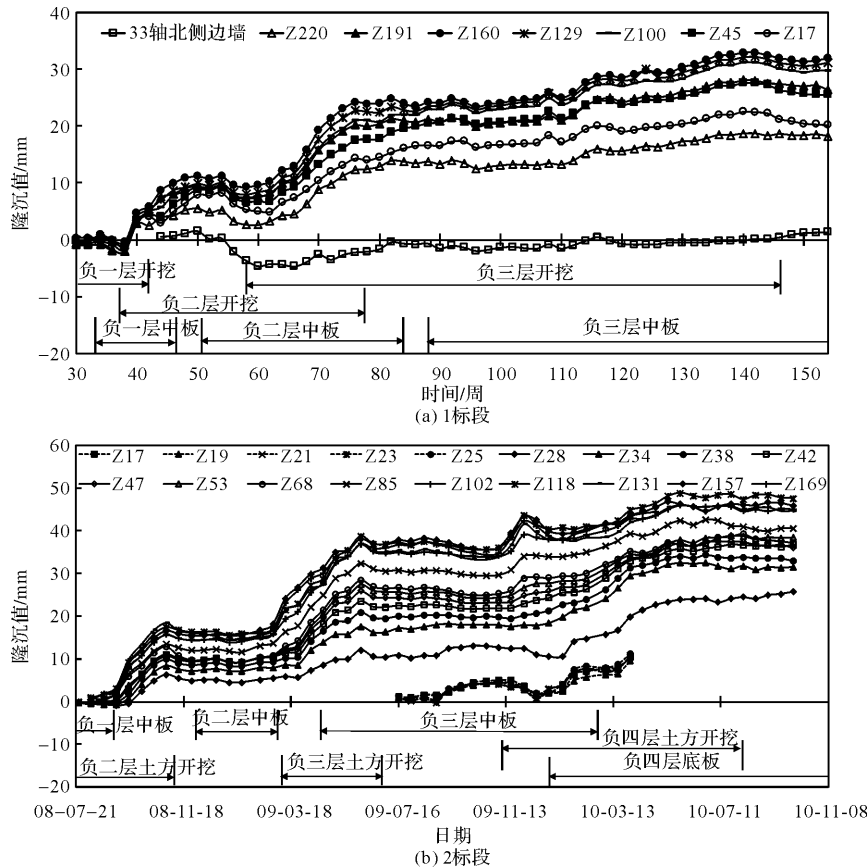


图6 1标段及2标段结构柱隆沉量时程曲线

Fig. 6 Heave vs time for columns of the excavation of section 1 and section 2

从图中可以看出,在负一层及负二层开挖阶段结构柱的隆起量相对较小,随着开挖深度继续增加,结构柱的隆起也随之更加明显。在基坑的施工全过程中,结构柱基本表现为开挖阶段隆起现象显著,层板施工阶段隆起稳定甚至发生轻微沉降。这与本工程中所观察得到的盖板及结构柱隆沉变化规律基本一致,从而验证了本文研究成果的准确性。

从图6(b)中观察可以发现,2标段基坑在负四层开挖阶段结构柱隆起时程曲线比较平缓,隆起量相对较小,这主要是由于负四层分区施工,每一区域土方开挖后立即对该区域进行底板浇筑,使得土方开挖与底板施工工况搭接,充分发挥结构整体性,结构柱的隆起能够得到有效控制。

3.2 盖板及中间柱隆起量分析

至本工程监测结束时,盖板与中间柱各测点隆起累计变化量在28.3~51.7 mm范围之间,本工程基坑开挖深度为14.8 m,则结构柱隆起量为 $(0.19\% \sim 0.35\%)D$ (D 为基坑开挖深度)。

根据天津地铁5、6号线车站的基坑立柱回弹实测数据统计规律,发现对于深度在15~18 m范围内的顺作法车站基坑,立柱回弹平均值在5~40 mm之间,约为开挖深度的0.05%~0.25%;而同等条件下,采用逆作法施工的地铁车站基坑,其立柱回弹量仅为顺作法的1/10~1/3量值^[21]。在文献[19, 20]中天津站地下换乘中心基坑工程1、2标段盖挖逆作基坑的主体结构柱隆沉监测结果表明,结构柱最终隆起量为 $(0.07\% \sim 0.16\%)D$ 。

通过与上述监测成果进行比较可以发现,本

项目基坑采用环形盖挖逆作、中心明挖顺作的半逆作法进行施工,盖板与结构柱的最终隆起量更接近于顺作法基坑的立柱回弹量值。究其原因主要是因为仅在基坑围护结构邻近几跨区域内采用盖挖逆作,中心区域地下结构暂不施工,导致地下结构的整体性远不及采用完全盖挖逆作法。尤其是在基坑中心区域缺少地下结构的制约,基坑回弹性状与明挖顺作基本相同。此外,本次盖板

与结构柱监测点布置均邻近中心明挖顺作区,受基坑回弹的影响更加直接且显著,也是导致监测的隆起量偏大的原因之一。

通过对完全盖挖逆作法基坑监测的研究^[20],在相同工况下,不同位置处结构柱的隆起量也不相同,表现为中部隆起量最大,离地下连续墙越近受制约作用越明显,结构柱的隆起量越小,如图7所示。

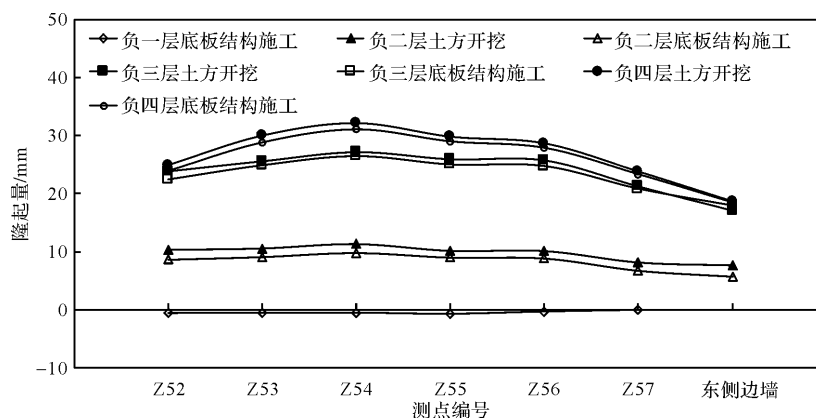


图7 2标段基坑不同施工阶段下结构柱隆沉曲线^[20]

Fig. 7 Heave of columns of the excavation of section 2 at different construction stages^[20]

由于本项目并未针对同一剖面下的中间柱的隆起变化进行监测布点,所以未得到相应的隆沉变化曲线。但是根据前人成果可以推测,在本项目盖挖逆作区域内,不同位置处的结构柱隆起量也不会相同,且距离基坑围护结构越近隆起量越小、距离中心明挖顺作区域越近隆起量越大。这将导致相邻柱之间在竖向产生差异变形,这种差异变形会引起已施作完成的地下结构产生相对变形和附加应力。当这种差异变形较大时,结构柱之间或结构柱与地下结构外墙之间已浇筑的层板与梁就会产生裂缝,严重时将危及结构安全。本项目采用环形盖挖逆作、中心明挖顺作的半逆作法进行施工,结构柱的隆起量比完全盖挖逆作法基坑更大,对于地下结构的影响也更加严重。因此需要针对相邻立柱间及立柱与侧墙之间的差异沉降进行密切监控,必要时应针对梁柱节点位置进行加强设计,避免结构柱的差异沉降引起结构梁板产生变形开裂问题。

4 结论

通过对天津某交通枢纽广场基坑地下结构盖板及结构柱的监测数据进行整理分析,研究环形

盖挖逆作、中心明挖顺作方法基坑地下结构的隆沉变化规律,并与顺作法基坑和完全逆作法基坑所得到的成果进行对比研究,主要得到以下结论:

(1)对于环形盖挖逆作、中心明挖顺作的基坑,当开挖深度较浅时,由于土体卸荷作用相对较小,且盖挖区域地下结构存在一定的整体性,导致结构柱的隆起变形量并不明显。随着基坑开挖深度增加引起土体卸荷作用增强,地下结构的结构柱隆起量会急剧增长;

(2)在基坑的施工全过程中,盖挖逆作区域内结构柱的竖向变形基本表现为开挖阶段隆起现象显著,层板施工阶段隆起稳定甚至发生轻微沉降。因此在施工进度安排中,将土方分区开挖并立即浇筑该区域层板结构,使土方开挖与结构层板施工的工况交替进行,一方面可以减缓基坑隆起发展,同时通过加强结构整体性以控制结构柱隆起;

(3)对于半逆作法施工的基坑,结构柱的最终隆起量为 $(0.19\% \sim 0.35\%)D$,数值更接近于顺作法基坑,明显大于完全盖挖逆作法施工的基坑,尤其是靠近中心顺作区域的结构柱,隆起量受基坑回弹的影响更加直接且显著。施工过程中需要针对相邻立柱间及立柱与侧墙之间的差异沉降进

行密切监控,必要时应针对梁柱节点位置进行加强设计,避免中间柱的差异沉降引起结构梁板产生变形开裂问题。

参考文献 References

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [2] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
DING Yongchun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [3] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35:1004-1017.
- [4] HU Z F, YUE Z Q, ZHOU J. Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5):933-948.
- [5] 梅源,袁一力,胡长明,等. 西安地铁深基坑变形模式统计规律分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(3):371-375.
MEI Yuan, YUAN Yili, HU Changming, et al. Statistical analysis of the construction deformation model of the deep foundation pit in Xi'an Metro Station[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(3):371-375.
- [6] 王卫东,徐中华,王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11):1659-1666.
WANG Weidong, XU Zhonghua, WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11):1659-1666.
- [7] LIU J, CAO H H, JIANG X F. Deformation monitoring and numerical analysis at the top of slope of a foundation pit[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013(353/356):640-643.
- [8] LIU G B, NG C W W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. Journal of Geotechnical & Environmental Engineering, 2005, 131(8):1004-1013.
- [9] 朱兴云,缪广吉,周宏伟,等. 软黏土中坑中坑式内支撑基坑抗隆起稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(4):505-513.
ZHU Xingyun, MIAO Guangji, ZHOU Hongwei, et al. Basal heave stability analysis of pit-in-pit braced excavations in clay[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(4):505-513.
- [10] 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.
- [11] LIN M J. Discussions on foundation pit construction scheme of large building in mountain area[J]. Applied Mechanics and Materials. 2014, 580:2289-2293.
- [12] 周均立. 临近供能管沟的超大深基坑支护设计与施工实践[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(3):401-407, 415.
ZHOU Junli. Design and construction practice of super-large deep foundation pit adjacent to energy supply pipeline[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(3):401-407, 415.
- [13] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1):87-98.
- [14] 刘国彬,黄院雄,侯学渊. 基坑回弹的实用算法[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4):61-67.
LIU Guobin, HUANG Yuanxiong, HOU Xueyuan. A Practical method for calculating a heave of excavated foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4):61-67.
- [15] 徐彪,刘佳. 对深基坑坑底隆起问题的探讨[J]. 广西工学院学报, 2004, 15(1):66-68.
XU Biao, LIU Jia. An inquiry into the problem of upheaval in the bottom of the deep foundation pit[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2004, 15(1):66-68.
- [16] 陆培毅,余建星,肖健. 深基坑回弹的空间性状研究[J]. 天津大学学报, 2006, 39(3):301-305.
LU Peiyi, YU Jianxing, XIAO Jian. Three-Dimensional Properties of Foundation Pit Resilience Under Unloading[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(3):301-305.

HAO Ling, YANG Haozhong HE Jie. TOD theory probed reconstruct planning of the City's old district [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, (2): 277-282.

- [16] 成都市规划管理局. 锦江区分区详细规划(2016-2035年) [EB/OL]. 2017-12-27. [2022-09-25]. http://mpnr.chengdu.gov.cn/ghhzrzyj/tzgg/2019-07/03/content_09bf86a2714b4e649b6c5aa3a87c238c.shtml.

Chengdu Planning Administration. Detailed Zoning Plan of Jinjiang District (2016-2035) [EB/OL]. 2017-12-27. [2022-09-25]. http://mpnr.chengdu.gov.cn/ghhzrzyj/tzgg/2019-07/03/content_09bf86a2714b4e649b6c5aa3a87c238c.shtml.

(编辑 桂智刚)

(上接第 664 页)

- [17] 宰金珉. 开挖回弹预测的简化方法[J]. 南京建筑工程学院学报, 1997(2): 23-27.

ZAI Jinmin. The Simplified method of prediction for the foundation ditches rebound of excavation[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1997(2): 23-27.

- [18] 刘毅, 张勇, 袁青, 等. 邻近边坡地铁车站基坑顺逆结合施工稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(6): 873-881.

LIU Yi, ZHANG Yong, YUAN Qing, et al. Analysis on the stability of bias metro station pit excavated through the combination method of bottom-up and top-down technology [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51 (6): 873-881.

- [19] 郑刚, 张立明, 王琦, 等. 基坑开挖对坑内工程桩影响的实测及有限元分析[J]. 天津大学学报, 2012, 45 (12): 1062-1070.

ZHENG Gang, ZHANG Liming, WANG Qi, et al.

Field observation and finite element analysis of effect of overlying excavation on piles[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(12): 1062-1070.

- [20] 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(10): 930-937.

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 (10): 930-937.

- [21] 郑刚, 张涛, 程雪松, 等. 天津地铁车站基坑立柱回弹的实测统计分析[J]. 岩土力学, 2017(S1): 387-394.

ZHENG Gang, ZHANG Tao, CHENG Xuesong, et al. Statistical analysis of measured data of center post upheaval in metro station excavations in Tianjin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017(S1): 387-394.

(编辑 桂智刚)