

DOI: 10.7672/sgjs2026130079

超大深基坑群开挖变形特征及其相互影响分析*

郭洪军¹, 向 鹏², 杨应辉¹, 刘卫东¹, 王文胜²

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100023; 2. 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083)

[摘要] 以北京某交通枢纽工程为背景, 根据水文地质条件、施工工况、基坑开挖方式以及支护方案, 对相邻基坑协同开挖过程中地下连续墙的变形、地表沉降、立柱变形进行现场监测并对数据进行分析, 研究超大深基坑在协同开挖过程中支护结构的变形规律。并通过 PLAXIS 3D 数值模拟分析不同工况下基坑变形, 得出控制变形的最优施工方案。结果表明: 受邻近基坑开挖的影响, 基坑围护墙中部测点最大深层水平位移为 13mm, 小于紧邻另一基坑角部测点的 16mm, “边角效应”减弱; 墙后地表沉降与围护墙变形密切相关; 在邻近基坑开挖的影响下, 垂直于共同地下连续墙方向及东西方向上的立柱位移基坑从东向西总体呈下降趋势, 东西差异最大值约 16mm, 不符合“边角效应”; 相邻两基坑协同开挖条件下, 采用逆序开挖(后挖)的方式对立柱的差异变形起到较好的控制作用, 东西不均匀沉降仅 0.015‰; 采用同步开挖对围护结构的最大变形有较好控制作用。

[关键词] 基坑; 支护; 变形; 监测; 空间效应; 数值模拟

[中图分类号] TU473

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0079-06

Deformation Characteristics and Mutual Influence Analysis of Excavation of Super Large Deep Foundation Excavation Group

GUO Hongjun¹, XIANG Peng², YANG Yinghui¹, LIU Weidong¹, WANG Wensheng²

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100023, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper took a transportation hub project in Beijing as its case study. Based on hydrogeological conditions, construction conditions, excavation methods, and support schemes, on-site monitoring was conducted to track the deformation of diaphragm walls, ground surface settlement, and column deformation during the coordinated excavation of adjacent excavations. The data were analyzed to investigate the deformation patterns of support structures in ultra-large deep foundation excavations during coordinated excavation. Furthermore, PLAXIS 3D numerical simulations were conducted to analyze foundation excavation deformation under various conditions, leading to the identification of the optimal construction plan for controlling deformation. The results indicate that, due to the influence of excavation in the adjacent foundation excavation, the maximum deep-level horizontal displacement at the central measurement point of the retaining wall was 13mm, which was less than the 16mm recorded at the corner measurement point adjacent to another foundation excavation, indicating a reduced “corner effect”. Surface settlement behind the wall was closely related to the deformation of the retaining wall. Under the influence of excavation in the adjacent foundation excavation, the displacement of the columns perpendicular to the direction of the common diaphragm wall and in the east-west direction generally decreases from east to west, with the maximum east-west difference being approximately 16mm, which does not conform to the “corner effect”. Under conditions of coordinated excavation of two adjacent excavation pits, the use of reverse-sequence excavation (post-excavation) effectively controlled differential deformation of the columns, with east-west uneven settlement of only 0.015‰. The use of simultaneous excavation effectively controlled the maximum deformation of the retaining structure.

* 北京城建集团有限责任公司创新项目: 超大规模地下交通枢纽施工时空效应、工程响应与施工控制研究

[作者简介] 郭洪军, 教授级高级工程师, E-mail: 963652806@qq.com

[收稿日期] 2026-02-20

Keywords: foundation excavation; supports; deformation; monitoring; spatial effect; simulation

0 引言

随着基坑开挖尺度的增大,多基坑同时开挖的工程也越来越多,基坑间的相互作用带来更复杂的土压力、基坑开挖变形等问题。支护结构的变形监测是保障基坑安全的重要方法^[1-2]。邵鹏等^[3]用微分体受力平衡的方法,基于极限平衡理论,利用力的平衡方程和微分方程,推导出两个相邻围护结构间有限土体土压力的计算公式;戴斌等^[4]采用数值模拟方法,以背景工程为基础模型,研究上海典型软土地区不同缓冲区宽度条件下,围护墙后土压力分布规律,提出了相邻基坑同步开挖合理的缓冲区宽度取值范围;林楠等^[5]以港珠澳大桥澳门口岸基坑群工程为研究对象,采用 Midas/GTS 建立三维数值分析模型,通过对比单个基坑开挖工况和基坑群分期开挖工况,分析大型基坑群分期开挖对相邻基坑的影响。王卫东等^[6]以上海地区规模最大、最复杂的基坑群工程之一的西岸传媒港与上海梦中心项目为背景,在综合考虑不同地块的开发进度需求、多地块叠加作用下敏感环境保护等问题的基础上,合理化基坑分区与实施流程。顾正瑞等^[7]以上海软土地区典型基坑群工程为背景,采用基于小应变土体本构模型并考虑土与结构共同作用的三维有限元方法,研究了不同缓冲区宽度对同步开挖基坑群变形的影响规律。

本文以北京某交通枢纽工程为背景,通过对现场监测数据的分析,研究多基坑协同开挖过程中支护结构的变形规律^[8-9],并利用 PLAXIS 3D 建立三维数值分析模型,模拟分析相邻共墙基坑不同工况

下的变形,为北京地区相似多基坑协同开挖工程的设计与施工提供参考。

1 工程概况

某工程基坑群东西长 600m,最大宽度 190m,基坑深度 32~35.5m。根据项目场区所在区域水文地质资料和本阶段水文地质勘察结果,土层分布及主要物理力学指标如表 1 所示。

基坑 1 支护主要为地下连续墙、工程桩、逆作桩、钢管柱、护坡桩等。基坑东侧地下连续墙(素墙)厚 800mm,深约 52m;南侧地下连续墙厚 1.2m,最深 54m;西侧地下连续墙厚 1.0m,最深约 52m;北侧地下连续墙厚 1.0m,深约 51m。地下 1 层、地下 2 层采用顺作方案,地下 3 层采用盖挖逆作法施工,基坑剖面如图 1 所示。

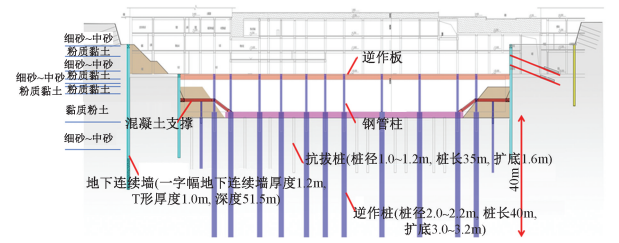


图 1 基坑典型剖面

Fig. 1 Typical cross-section of foundation excavation

从浇筑基础开始在施工期间和使用期连续进行长期的沉降观测,具体专项监测点布置如图 2 所示,基坑 1 内部分割线为监测点布置示意线。

2 监测数据分析

2.1 地下连续墙深层水平位移

基坑周边既有建筑物和邻近设施响应是由地

表 1 地层分布及主要物理力学参数

Table 1 Strata distribution and key physical-mechanical parameters

编号	土层名称	$\gamma_{\text{unsat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi'/(^{\circ})$	c'/kPa	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	K_0^{nc}	$G_0^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\gamma_{0.7}$
1	人工填土	15.50	19.58	10.0	0	2.5	5.2	18.2	0.826 4	36.4	2×10^{-4}
2	粉质黏土	19.03	19.53	23.6	15.72	11.6	11.6	40.6	0.599 7	81.2	2×10^{-4}
3	细砂	15.43	19.12	28.0	0	30.0	30.0	105.0	0.530 5	210.0	2×10^{-4}
5	细砂	16.98	20.26	28.0	0	50.0	50.0	175.0	0.531 0	350.0	3×10^{-4}
6	粉质黏土	19.49	19.49	28.0	58.60	21.2	21.2	106.0	0.531 0	212.0	3×10^{-4}
7	细砂	20.40	20.40	28.0	0	90.0	90.0	450.0	0.531 0	540.0	3×10^{-4}
8	粉质黏土	19.72	19.72	14.0	51.10	20.6	20.6	103.0	0.758 0	124.0	3×10^{-4}
9	细砂	20.60	20.60	28.0	0	110.0	110.0	550.0	0.531 0	250.0	3×10^{-4}
10	粉质黏土	19.82	19.82	18.7	91.80	28.8	28.8	144.0	0.679 0	250.0	3×10^{-4}
11	中砂	20.60	20.60	20.0	0	200.0	200.0	600.0	0.658 0	250.0	3×10^{-4}

注: γ_{unsat} 和 γ_{sat} 分别为天然重度和饱和重度; φ' 为内摩擦角; c' 为黏聚力; $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 为参考侧限压缩模量; E_{50}^{ref} 为参考三轴排水剪切割线模量,对应50%强度时的刚度; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为参考卸载再加载模量; K_0^{nc} 为静止侧压力系数; G_0^{ref} 为参考小应变初始剪切模量; $\gamma_{0.7}$ 为剪切模量衰减至0.7倍 G_0^{ref} 时的阈值应变

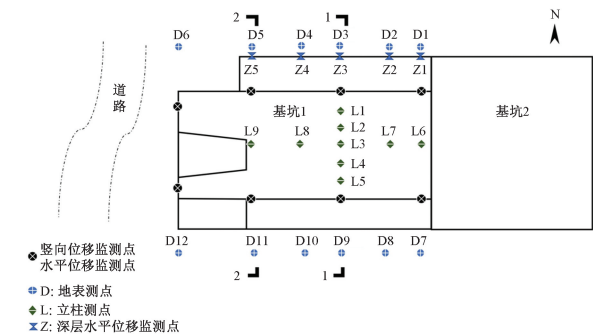


图2 基坑平面及监测点布置

Fig. 2 Plan view and monitoring points layout of foundation excavation

层运动引起,其本质上取决于基坑开挖卸荷导致的围护结构变形,北墙 Z1~Z5 施工结束后深层水平位移如图 3 所示。

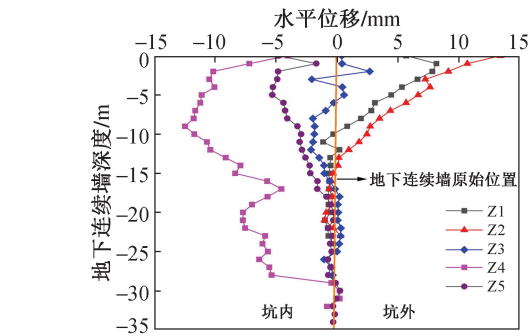


图3 北侧围护墙深层水平位移变化曲线

Fig. 3 Deep horizontal displacement curve of the north retaining wall

由图 3 可得,基坑 1 北侧围护结构水平位移监测数据呈现出显著的空间非均匀性与流变特征。在平面分布上,监测点位移矢量方向发生反转;邻近基坑 2 东侧区域的 Z1,Z2 测点呈现向基坑外侧的正向位移,且表现为 $Z2>Z1$;而远离基坑 2 西侧区域的 Z4,Z5 测点遵循常规变形规律,呈现向基坑内侧的负向位移,且受“边角效应”影响呈现 $Z4>Z5$;位于中部的 Z3 测点则处于位移极小值的过渡平衡区。

基坑 1 北侧围护墙的平面位移差异是“群坑叠加效应”与“基坑空间角效应”耦合作用的结果。东侧区域(Z1,Z2)的异常外移归因于相邻基坑 2 开挖引起的土体应力释放与位移场重分布,基坑 2 的卸荷作用对基坑 1 东侧土体产生了显著的侧向牵引(土体向基坑 2 方向蠕变),该牵引力抵消并超过了基坑 1 的主动土压力,导致围护结构发生背向基坑 1 的位移;其中 Z1 因邻近围护结构转角处,受“边角效应”约束限制,其变形量小于受约束较弱的 Z2 测点。西侧区域(Z4,Z5)因远离相邻基坑影响范围,

主要受基坑内侧卸荷引发的主动土压力控制,表现为常规内移;Z5 因紧邻西侧转角,受“边角效应”影响,刚度较大,故位移显著小于趋近于平面应变状态的 Z4 测点。中部 Z3 测点则位于两股反向变形势能(坑 1 内倾势能与坑 2 外牵势能)的应力中性点,从而呈现微小变形。

在竖向分布上,Z4 测点深层水平位移曲线表现出罕见的非单调性“波动”特征,分别在 0~-10m 及 -17~-23m 深度区间出现位移速率显著增大现象,而在 -10~-17m 及 -23m 以下区间位移显著收敛。经地质比对,位移突增区间与地层中粉质黏土(软弱夹层)的分布高度吻合。粉质黏土夹层压缩模量(E_s)低、水平抗力系数(k_h)衰减,导致墙体发生局部“鼓肚”状挠曲;而 -10~-17m 密实砂层的高刚度则形成“箍束”效应,限制了侧移。然而,这种由岩性主导的非单调变形特征在其他区域被显著抑制。对于东侧邻近群坑效应区(Z1,Z2),基坑 2 开挖引发的广义土体位移场起主导作用,强烈的深层牵引导致围护结构发生近似“刚体平移”或整体倾覆,掩盖了层间刚度差异引起的局部相对变形;对于西侧角部区域的 Z5 测点,受“边角效应”约束限制,有效屏蔽了软弱夹层的主动土压力,限制了墙体的自由挠曲。

2.2 地表沉降

选取基坑开挖至设计标高后的地表监测数据进行分析,其中测点 D1~D5 及 D7~D11 的位移分布如图 4 所示。为进一步探究围护结构变形对周边环境的影响,选取与围护墙测点 Z1~Z5 空间位置对应的地表测点 D1~D5 数据,绘制墙后地表位移云图如图 5 所示。

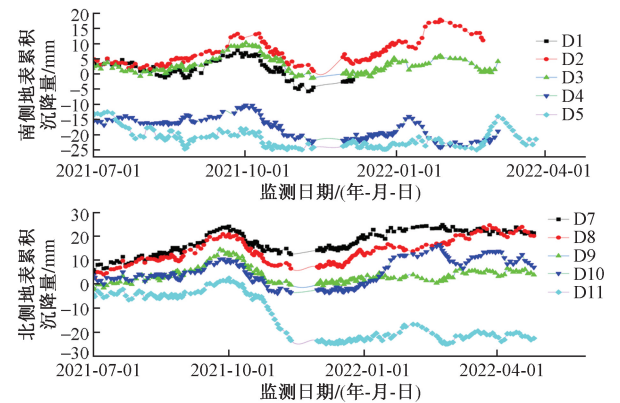


图4 位移监测曲线

Fig. 4 Displacement monitoring curves

如图 5 中 D3~D5 测区所示,D4,D5 测点呈现显著的地表沉降特征;对比图 3 可知,与其位置对应

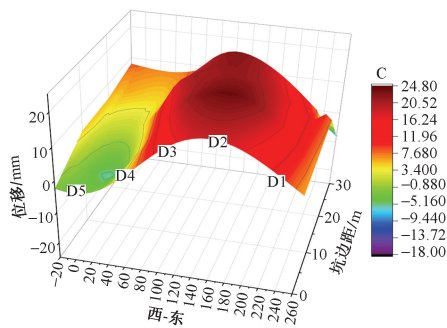


图 5 开挖结束后北部地表位移

Fig. 5 Ground surface displacement at the northern section after excavation completion

的围护墙测点 Z4,Z5 同步表现出向坑内旋转的变形模式。该现象的力学机理主要归因于墙后土体的塑性流动(见图 6):随着开挖卸荷,墙后土体进入朗肯主动极限状态,塑性滑移面不断向深部扩展,驱动围护结构发生如图 7 中模式①所示的向坑内转动。这种结构变形进一步诱发了坑外土体向坑内的塑性流失,从而在宏观上表现为墙后地表的显著沉降。

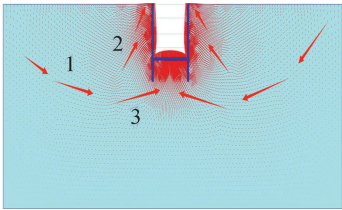


图 6 墙后土体塑性流动

Fig. 6 Soil plastic flow behind the wall

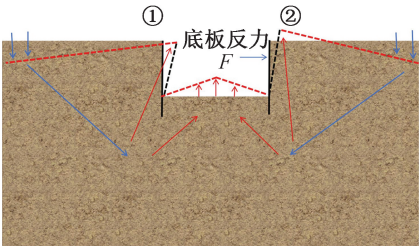


图 7 土体-墙协同变形

Fig. 7 Coordinated deformation between soil and wall

如图 5 中 D1~D3 测区所示,墙后地表 D1,D2 测点表现出显著的隆起特征;与其空间位置对应的围护结构测点 Z1,Z2 亦呈现出向坑外侧旋转的变形趋势。其力学机理分析如下:在基坑底板反力及两侧非对称土压力的耦合作用下,地下连续墙顶部向坑外侧(即有限土体一侧)发生侧向挤压位移。这种强制位移导致墙后有限土条受到压缩,促使上部土体的应力状态呈现被动土压力特征^[3]。该变形机制与图 7 中模式②所示的围护墙外倾旋转模式

相吻合,在此模式下,围护墙外侧朗肯被动区内的土体受到强烈扰动并发生向外的塑性流动,最终在宏观上体现为地表隆起现象。

围护结构的侧向变形与墙后地表的竖向位移之间表现出显著的空间协同与联动效应。其具体的耦合变形机制如图 7 所示:当围护墙发生向坑内的内倾旋转时,诱发墙后地表沉降(图 7 中模式①);反之,当围护墙受外力挤压发生向坑外的外倾旋转时,则导致墙后地表隆起(图 7 中模式②)。将该理论模式与现场实测数据进行比对可知:东侧 Z1,Z2 测点呈现外倾变形,其对应的地表测点 D1,D2 表现为隆起,与模式②高度吻合;西侧 Z4,Z5 测点呈现内倾变形,其对应的地表测点 D4,D5 表现为沉降,其变形规律及云图特征与模式①完全一致。实测结果充分验证了上述变形机理分析的正确性。

2.3 立柱位移

以施工阶段 J1~J5 为分析时域,选取基坑内两组典型剖面的立柱监测数据进行时空演化分析:一组为沿南北向(平行于共用地下连续墙)分布的测点 L1~L5;另一组为沿东西向(垂直于共用地下连续墙)分布的测点 L6~L9,其位移曲线如图 8 所示。

由图 8a,8b 可知,南北向立柱的隆起分布总体呈现“中部大、两端小”的凸形规律,这在一定程度上符合基坑变形的“时空效应”与“边角效应”理论^[8]。然而,曲线表现出显著的偏态分布特征:最大隆起峰值并未位于几何中心 L3 处,而是偏移至距北墙 40m 的 L2 处,且 L3~L5 区域的隆起值趋于平缓。机理揭示:这种变形的非对称性源于南北边界条件的极端差异。基坑北侧紧邻铁路,列车运行产生的巨大静、动力荷载使得该区域深部土体处于高初始应力状态,开挖卸荷后释放的弹性势能导致土体回弹更为剧烈;反观南侧,由于相邻基坑已先行开挖形成了应力释放区,土体回弹潜能已部分消耗。这种差异导致卸荷回弹峰值向高荷载的北侧偏移,而随着远离铁路荷载影响范围(>60m),隆起量迅速衰减并趋于稳定。

由图 8c,8d 可知,东西向立柱位移呈现出显著的单向递减趋势(自东向西),完全偏离了单一基坑的对称性“边角效应”规律。紧邻东墙(靠近相邻基坑 2)的区域隆起量最大,东西向差异峰值达 16mm。这表明相邻基坑 2 的开挖卸荷效应通过共用墙体或土体传递,对本基坑东侧立柱产生了强烈的叠加影响,改变了原有的应力场分布。

综上所述,深基坑群开挖过程中的立柱受力与变形状态受相邻基坑及周边荷载环境的显著制约,

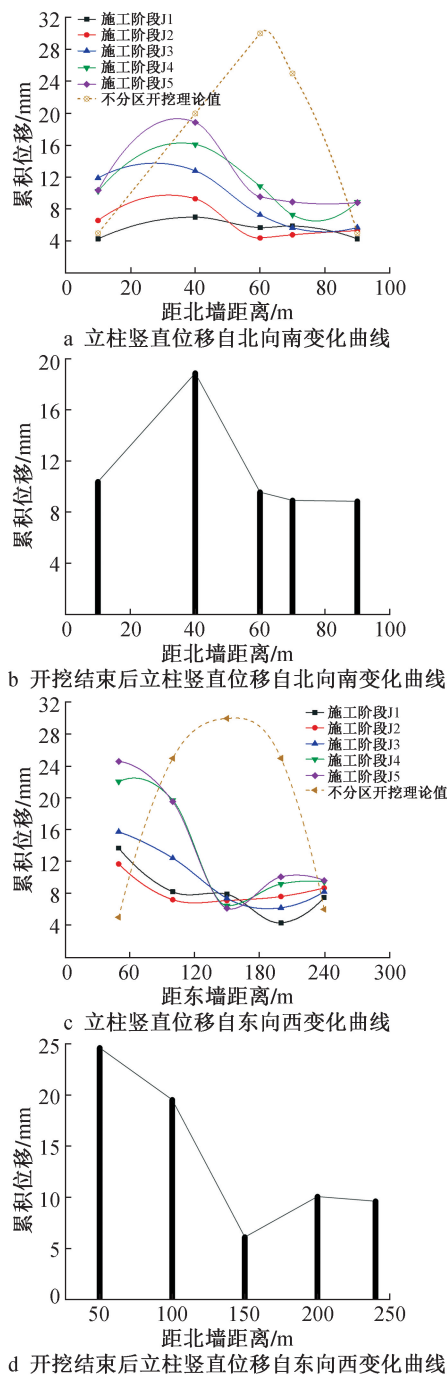


图 8 立柱空间变化曲线

Fig. 8 Spatial variation curve of the column

其变形规律具有复杂的非对称性与叠加性,不能简单沿用单一基坑开挖的空间效应理论进行预测。

3 有限元分析

为研究基坑 2 开挖对基坑 1 立柱变形的影响,对相邻基坑协同开挖进行数值模拟,对不同工况下基坑的变形进行对比分析,研究相邻基坑开挖间的相互影响,得出控制变形的最佳施工方案。

3.1 有限元模型

在进行数值模拟计算过程中选择 HSS 本构模

型为土体的本构,基坑 1 与基坑 2 东西长 600m,南北宽 190m。地层土体物理力学参数如表 1 所示,围护结构物理力学参数如表 2 所示,基坑三维计算模型如图 9 所示。

表 2 围护结构力学参数

Table 2 Mechanical parameters of retaining structure		
名称	弹性模量/Pa	重度/(kN·m ⁻³)
地下连续墙	$E_1 = 1.46 \times 10^7$	2.55
	$E_2 = 7.3 \times 10^5$	
冠梁	2.1×10^8	78.50
逆作桩	3×10^7	24.00

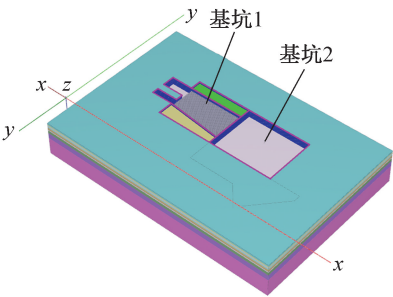


图 9 计算模型

Fig. 9 Computational model

3.2 开挖工况设计

为研究相邻基坑协同开挖对基坑变形的影响,通过改变基坑 1 与基坑 2 的开挖支护顺序,确定控制变形最有效的施工工况,如表 3 所示。

表 3 模型工况

Table 3 Computational model	
模拟工况	施工内容
工况 1	同步开挖:基坑 1 与基坑 2 共同开挖施工
工况 2	顺序开挖:先开挖基坑 1,再开挖基坑 2
工况 3	逆序开挖:先开挖基坑 2,再开挖基坑 1

3.3 模拟结果分析

立柱的竖向位移影响着上部结构的稳定,立柱的不均匀变化会导致底板的不均匀变形,围护结构变形过大会导致结构发生失稳破坏,因此选择立柱的竖向位移以及围护结构的最大位移作为本文重点分析对象,计算结果如图 10~13 所示。

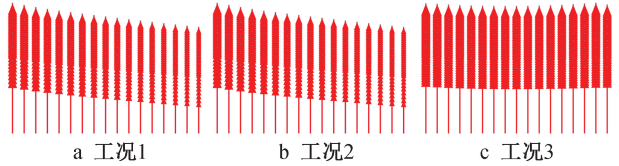


图 10 立柱竖向位移计算结果

Fig. 10 Calculated results of vertical displacement of the column

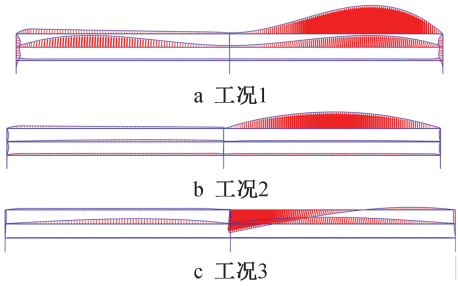


图 11 各工况施工结束后基坑底板、围护墙总位移
Fig. 11 Total displacement of the foundation excavation base slab and retaining wall after each construction stage

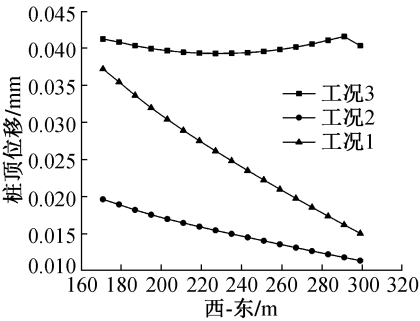


图 12 各工况施工结束后立柱竖向位移
Fig. 12 Vertical displacement of columns after each construction stage

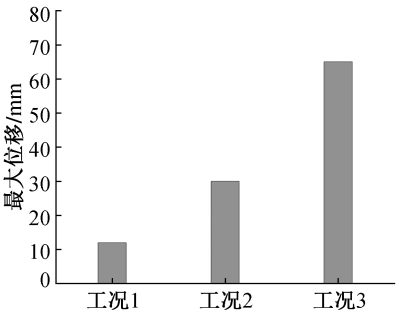


图 13 各工况施工结束后底板、围护墙最大位移
Fig. 13 Maximum displacement of the base slab and retaining wall after each construction stage

可以看出,工况 3 下立柱的差异沉降最小,最大差值不到 2.5mm,东西不均匀沉降仅约 0.015‰;工况 1 下立柱的差异沉降最大,自西向东减小,即靠近基坑 2 处的立柱隆起值较小,最大差值约 22mm;工况 2 下的立柱变形趋势与工况 1 相似,最大差值约 8.5mm。同步开挖时,两个基坑同时卸荷,应力在整个区域被分散释放,导致整体最大位移最小,但相互作用引发强烈的不均匀回弹,使得差异沉降最大;逆序开挖则通过先开挖关键基坑,将绝大部分应力释放和位移集中在该区域,导致其局部位移最大,但后续开挖对已稳定土体扰动极小,因此实现了最优的差异沉降控制。两侧同步开挖卸载有利

于围护体最大变形控制,这与马险峰等^[9]所得结论一致。

4 结语

1) 超大深基坑群协同开挖导致传统“边角效应”发生显著的空间异化,受相邻基坑卸荷牵引与群坑叠加效应的耦合影响,基坑交界处的角部刚度约束机制显著弱化甚至失效,呈现出角点位移反常激增的特征;而远离交界区的独立角点则仍遵循常规的空间约束规律。这种由“群坑相互作用”主导的非对称变形模式,打破了单一基坑“两端小、中间大”的经典规律,表明在紧邻区域,群坑效应已取代边角效应成为控制变形的关键因素。

2) 超大深基坑围护结构与周边地表变形呈现出显著的“运动协同机制”,围护墙的变形模式受底板、斜撑等支撑体系的刚度及反力状态直接调控,并决定了墙后土体的破坏形态:当围护墙发生内倾旋转时,驱动墙后土体进入主动极限状态,诱发地表沉降;反之,当围护结构受底板或支撑系统强力挤压产生外倾旋转时,墙后有限土体被迫转化为被动土压力状态,导致地表发生隆起。

3) 多基坑协同开挖卸载会对相邻基坑的立柱变形造成较大影响,在两基坑交界处影响更为明显。

4) 相邻两基坑协同开挖条件下,相比于顺序开挖(先挖)、同步开挖,采用逆序开挖(后挖)的方式对立柱的差异变形能起到较好的控制作用,采用同步开挖有利于围护体变形的控制。

参考文献:

[1] 徐振斯,庞复海,邓宇,等. 某建筑深基坑支护结构设计及智能化监测[J]. 岩土工程技术,2023,37(6):731-736.
XU Z S, PANG F H, DENG Y, et al. Complex slope design and intelligent monitoring technology for an ultra-high-rise deep foundation pit[J]. Geotechnical engineering technique, 2023, 37(6):731-736.
[2] 周云军,丁盼. 复杂环境下软土基坑分区开挖数值模拟及监测分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(7):71-76.
ZHOU Y J, DING P. Numerical simulation and monitoring analysis of zonal excavation of soft soil foundation excavation in complex environments [J]. Construction technology, 2025, 54(7):71-76.
[3] 邵鹏,朱春柏,潘静杰,等. 基坑群间有限土压力及支护结构相互作用研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S1):187-195.
SHAO P, ZHU C B, PAN J J, et al. Study on the interaction of limited earth pressure and supporting structure between deep foundation pits[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(S1):187-195.