

DOI: 10.7672/sgjs2026130073

某超大深基坑开挖立柱隆起变形特征及影响因素分析*

金大春¹, 向鹏², 冯国俊¹, 张志伟¹, 闫宇雷¹

(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] 以北京某综合交通枢纽基坑为例, 分析了超大深基坑开挖过程中回弹变形的时空演化规律和变异特征, 监测分析表明该基坑早期开挖立柱隆起量平均 60mm, 局部超过 90mm, 远超同深度普通基坑。通过设计正交模拟试验对基坑变形敏感性因素进行分析, 明确了基坑开挖深度和地下水是立柱隆起关键影响因素。现场开挖记录也表明, 基坑 7 月开挖土方量巨大, 大体积土方快速开挖带来的强烈卸荷效应是立柱早期异常隆起的主要原因, 此外超常规降雨带来的地下水位往复上升对坑底回弹也有重要影响, 降低开挖速度和及时降水能有效减少开挖回弹变形。

[关键词] 交通枢纽; 深基坑; 回弹; 变形; 隆起; 敏感性因素

[中图分类号] TU448

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0073-06

Analysis of Characteristics and Influencing Factors of Column Uplift Deformation During Excavation of Super Large Deep Foundation Excavation

JIN Dachun¹, XIANG Peng², FENG Guojun¹, ZHANG Zhiwei¹, YAN Yulei¹

(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: Taking the foundation excavation of a comprehensive transportation hub in Beijing as an example, this paper analyzed the spatiotemporal evolution and variability of rebound deformation during the excavation of an ultra-large deep foundation excavation. Monitoring and analysis revealed that during the early stages of excavation, the average uplift of the columns was 60mm, with local values exceeding 90mm—far exceeding that of ordinary foundation excavation of the same depth. Through orthogonal simulation experiments designed to analyze factors affecting foundation excavation deformation, it was determined that excavation depth and groundwater are the key factors influencing column uplift. On-site excavation records also indicate that the excavation volume in July was enormous. The intense unloading effect caused by the rapid excavation of large volumes of soil was the primary cause of the abnormal early uplift of the columns. Furthermore, the cyclical rise in the groundwater level caused by exceptional rainfall had a significant impact on the rebound at the bottom of the foundation excavation. Reducing the excavation speed and implementing timely dewatering can effectively minimize excavation rebound deformation.

Keywords: transportation hubs; deep foundation excavation; rebound; deformation; uplift; sensitivity factors

0 引言

随着城市地下空间开发规模增长, 超大超深基

坑工程不断涌现, 由于基坑尺寸增大, 基坑开挖一次卸荷量显著增大, 使得周边土体位移场、应力场发生巨大变化, 其中开挖卸荷引起的坑底土体回弹变形导致坑内桩柱产生差异沉降以及坑周土体变形显著。统计表明, 深大基坑开挖引起的坑底隆起变形甚至超过 10cm, 对基坑的稳定性以及围护结构

* 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] 金大春, 教授级高级工程师, E-mail: 963469370@qq.com

[收稿日期] 2026-02-20

和邻近构筑物的受力变形影响不容忽视^[1-3]。尤其是对逆作法工程,坑底卸荷回弹带来的竖向立柱桩之间及立柱桩与围护墙之间的差异沉降对上部结构安全带来严重威胁,已成为工程师和学者重点关注的对象^[4-5]。王文灿等^[6]结合监测结果分析了立柱位置、开挖深度对立柱竖向变形的影响。郑刚等^[7]对天津地铁 5,6 号线车站基坑立柱回弹的实测数据进行了统计分析。冯虎等^[8]分析了立柱竖向位移下钢支撑受力特性。目前对于立柱及立柱桩的隆起机制、影响因素等方面研究仍然不完善,本文以北京某半逆作超大深基坑工程为例,采用现场监测和数值分析对逆作法施工过程中主体结构柱隆沉变化规律及其影响因素进行了系统研究,为类似超大深基坑工程建设提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

北京某综合交通枢纽 02 标段基坑长 600m,宽 120~190m,基坑面积 10.86 万 m²,基坑深度 32.617~36.847m,为超大规模深基坑工程,根据施工主体该标段被划分为 2 个区域,用 1m 厚素混凝土墙隔开,其中西咽喉区东西向长度约 360m,宽度 120~190m,最深约 40m,基坑分区如图 1 所示,坑中典型剖面如图 2 所示。根据施工工法不同,基坑划分为 A,B,C 3 个大区域,其中主基坑 A 区又划分 A1,A2,A3 3 个区域。A 区地下 3 层全部逆作施工,A3 区、B 区的地下 2 层在边跨逆作施工,C 区的地下 2 层和地下 3 层逆作施工,其余均顺作施工。开挖流程大致如下:先从地表 21.000m 标高放坡开挖至 13.000m 标高,在该平台施工地下连续墙及工程桩、逆作柱,然后进行降水和分层开挖,并施作相应支撑结构,主体部分地下 3 层逆作顶板在标高 2.000m 位置,基坑底板平均标高为-14.500m。

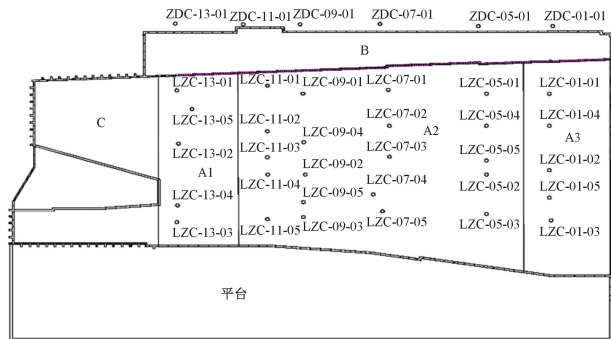


图 1 西咽喉区基坑分区及监测布置

Fig. 1 Zoning and monitoring layout of the foundation excavation in the west throat area

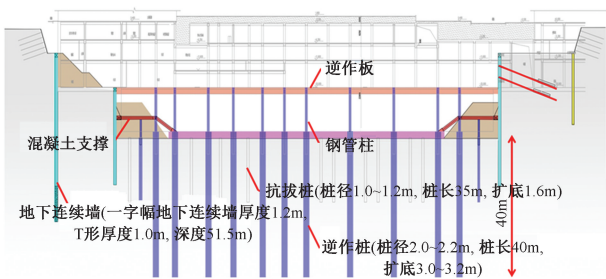


图 2 基坑典型剖面结构

Fig. 2 Typical cross-section structure of foundation excavation

1.2 水文地质条件

基坑底部位于新近沉积的细砂土层中,基坑工程深度在 80.0m 范围内,主要包括素填土、黏质粉土、砂质粉土、粉质黏土、黏土、砂土层。黏性土层孔隙比较大,压缩模量低,抗剪强度低,呈中高~高压缩性,工程性质相对较差,粉土、砂土层等工程性质相对稍好,一般呈中密状态,基坑开挖大部分位于该土层中,深部砂土层为钻孔灌注桩基础的桩端持力层。

对基坑工程施工有直接影响的地下水主要赋存在埋深约 40m 范围内的细砂、中砂(局部含砾石)层中,地下水类型为潜水,水位埋深为 6.43~15.51m 以及赋存在埋深 45~50m 范围内的细砂、中砂层中,地下水类型为承压水,水位埋深为 11.62~17.40m。基坑开挖前采用真空降水管井方式降水,保证坑底土体满足抗承压水稳定性要求。

1.3 施工工况

现场施工划分为 3 个区,具体施工流程如表 1 所示。各分区工况流程如图 3 所示。

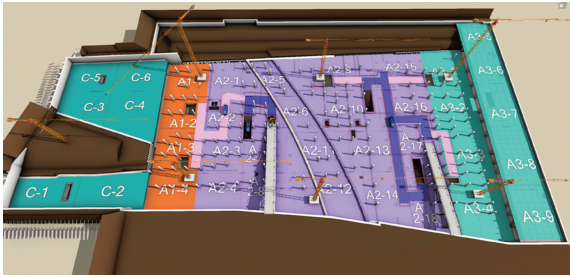


图 3 各分区工况流程

Fig. 3 Flow chart of construction stages for each zone

2 现场监测结果分析

根据现场施工记录,2021 年 6 月中旬现场测量发现东 3 跨土方(A3 区)开挖过程中逆作桩桩顶隆起 20~30mm,2021 年 7 月下旬测量发现 A1,A2 区土方开挖至 3.000m 标高左右时逆作桩桩顶平均隆起 50~60mm,局部立柱隆起超过 100mm,立柱整体

表 1 分区施工开挖工况

Table 1 Construction excavation stages for different zones

施工阶段	施工活动		
	A 区	B 区	C 区
	场地平整,放坡开挖至 13.000m 标高,施工地下连续墙及工程桩		
J1	施作冠梁,A 区开挖至地下 2 层顶板下 2.5m,A1~A2 区第 2 道锚索	施作冠梁,开挖地下 2 层反压土	施作冠梁,开挖至 C 区地下 2 层顶板下 2.5m,施作第 3 道支撑锚索及 C 区南地下 2 层顶板
J2	A 区开挖至地下 3 层顶板,施作 A1~A2 区地下 3 层顶板	开挖至第 2 层反压土底	开挖至 C 区地下 3 层顶板
J3	开挖至 A1~A2 区底板反压土顶,施作 A1~2 区第 4 道支撑(斜撑)	—	C 区施作地下 3 层顶板,开挖至 C 区地下 3 层第 1 道对撑,施作 C 区地下 3 层第 2 道对撑
J4	A3 区开挖至地下 3 层底板施作腰梁,A3 区地下 3 层底板,斜撑	—	开挖至 C 区地下 3 层第 2 道对撑施作 C 区地下 3 层第 2 道对撑
J5	A1~A2 区开挖至地下 3 层底板,A3 区反压土开挖	—	C 区开挖至地下 3 层底板
J6	施作 A1~A2 区地下 3 层底板	开挖至地下 2 层底板	施作底板
J7	A1~A2 区第 5 道支撑(斜撑)	施作底板,斜撑	—
J8	开挖反压土		

隆起位移较大(见图 4)。

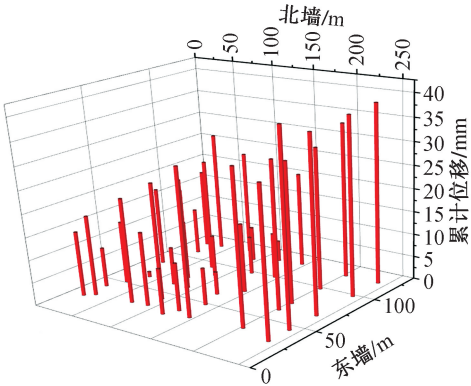


图 4 7 月底立柱隆起空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of column heave at the end of July

结合立柱累计竖向变形(见图 5)及墙顶累计竖向变形曲线(见图 6)可知,2021 年 7 月 30 日后的监测数据随施工工况呈现出显著的阶段性演化特征。第 1 阶段(2021 年 8 月—9 月)为浅层开挖卸荷期,受开挖标高差异影响,A3 区(开挖深 8m)立柱及坡顶在强卸荷作用下发生急剧回弹,最大隆起量达 28mm,显著高于 A2 区(开挖深 2m)的 13mm 隆起值;第 2 阶段(2021 年 10 月—12 月下旬)为结构加载沉降期,随着地下 3 层逆作顶板浇筑完成及结构自重施加,土体回弹势能被有效抑制,变形场由回弹转为固结沉降,导致 A2 区立柱及坡顶出现 10~15mm 的沉降回调;第 3 阶段(2022 年 1 月—9 月)为板下暗挖复弹期,逆作板下土体的集中开挖再次激活坑底卸荷效应,诱发立柱变形发生“沉降-隆起”逆转,新增隆起量约 15mm。

究其变形机理,基坑深挖 13m 引发的坑底土体

应力释放与回弹是立柱隆起的根本动因,而施工前期地表堆载的分布特征则是导致局部差异性隆起的控制因素。现场修筑的 3 座临时土马道及 2 座钢栈桥作为高强度偏心荷载,改变了基坑周边的应力边界条件,在坑底形成“堆载侧强约束、无载侧自由释放”的非对称力学状态。这种不平衡约束破坏了坑底土体回弹的空间对称性,导致无荷载约束区域的土体及立柱在卸荷过程中表现出更为剧烈的隆起响应。

基于地下连续墙变形时程曲线可知,围护体系的竖向位移特征与现场开挖工况表现出高度的时空同步性。在东 3 跨区域,监测点 ZDC-01-02 于 6 月中下旬受土层由 13.000m 标高快速挖至 8.000m 标高的强卸荷驱动,墙顶出现约 4mm 的急剧隆起,并伴随立柱 20~30mm 的同步抬升;进入 7 月初,受土方开挖停滞及地下 2 层逆作顶板施作产生的结构压重影响,墙体隆起趋势呈现回落与波动特征;至 8 月底,随着 A3 区土层进一步由 8.000m 标高开挖至 0m,深层卸荷效应再次诱发墙体位移快速增加。在基坑中部 A2 区,监测点 ZDC-07-02,ZDC-11-02 自 6 月底起即表现出显著的卸荷响应,受该区域由 13.000m 标高连续开挖至 3.000m 标高的工况影响,墙顶快速隆起约 10mm,对应立柱平均隆起量达 50~60mm。上述演化规律证实,立柱与地下连续墙的竖向变形严格受控于开挖卸荷过程,大规模土体移除打破了地层应力平衡,驱动“坑底土体-立柱-地下连续墙”体系发生整体协同隆起。

地表变形时程曲线揭示了变形随施工工况更迭呈现显著的阶段性演化特征(见图 7),具体表现

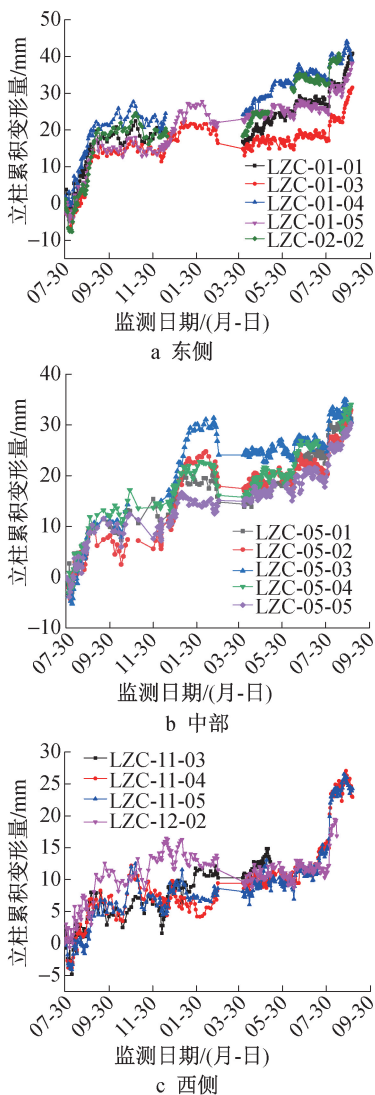


图 5 立柱累计变形时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of cumulative deformation of columns

为地下 3 层逆作顶板施作期的结构加载沉降与后续板下土体开挖期的卸荷回弹交替进行的波动规律。在空间分布上,变形场呈现出截然不同的“东隆西沉”非对称模式,其中东侧及北侧的隆起量显著高于西侧及南侧,且与立柱隆起保持高度同步。这种差异性变形机制主要源于边界条件的本质不同,东侧区域受相邻基坑先行开挖影响已形成低能级的应力松弛区,本次开挖实质上属于敏感度更高的“二次卸荷”过程,极易诱发剧烈回弹,加之该侧围护结构缺乏强角部约束,易产生向坑内的“踢脚”变形并机械性挤压坑底土体向上隆起;而西侧受基坑角部强“三维空间效应”约束,围护体系刚度大且侧移受限,有效抑制了坑底隆起,故变形场主要受控于墙后土体的自然固结沉降。

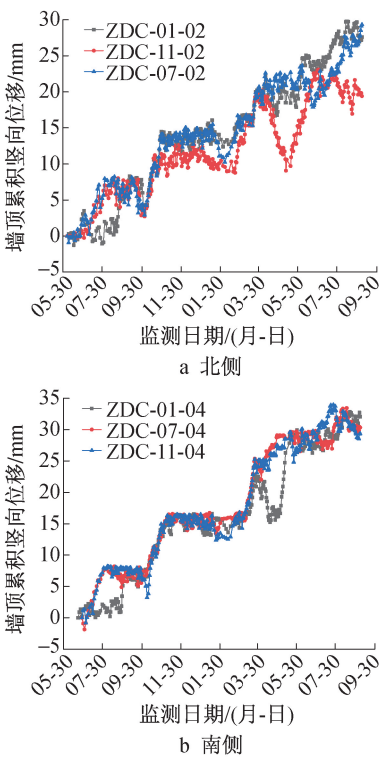


图 6 地下连续墙顶部竖向位移随时间变化曲线

Fig. 6 Time-history curve of vertical displacement at the top of diaphragm wall

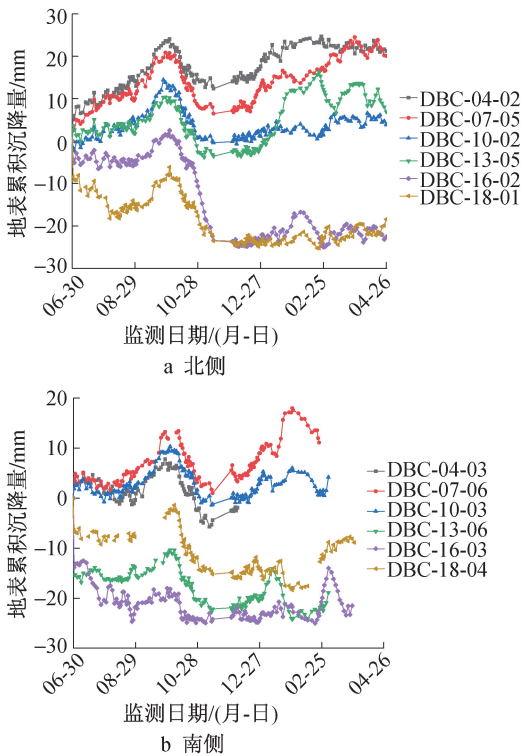


图 7 地表累计沉降量

Fig. 7 Cumulative ground settlement

3 基坑隆起变形影响因素敏感性分析

结合基坑施工图建立三维数值仿真模型(见图

8),整体模型尺寸为470m×440m×130m($x \times y \times z$)。模型底部为固定边界,顶部为自由边界,其余边界约束法向位移。采用修正莫尔-库伦本构模型,结合工程监测数据,通过参数分析获得适合该工程的修正莫尔-库伦本构模型刚度参数,如表2所示。

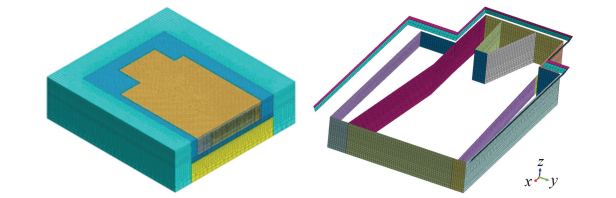


图8 三维有限元模型网格

Fig. 8 Mesh of the three-dimensional finite element model

表2 土层参数

Table 2 Soil layer parameters

地层名称	土层厚度 h/m	土层标高 z/m	回弹模量/ MPa
细砂	11.8	-6.800	106.0
重粉质黏土~粉质黏土	4.4	-11.200	45.0
细砂	2.9	-14.100	106.0
有机质黏土	3.5	-17.600	76.1
黏质粉土~砂质粉土	4.0	-21.600	85.6
细砂	6.4	-28.000	106.0
粉质黏土~重粉质黏土	3.2	-31.200	57.1
黏质粉土~砂质粉土	3.5	-34.700	85.6
细砂	2.0	-36.700	106.0
粉质黏土~重粉质黏土	2.1	-38.800	57.1
细砂	2.1	-40.900	106.0

采用基坑开挖到底时的基坑立柱沉降、基坑内部地下连续墙位移和基坑周围地表沉降值衡量基坑的稳定性,根据研究现状内容选取基坑深度、降水幅度、长宽比、立柱纵横间隔、立柱长和立柱直径6个基坑开挖设计参数作为影响因素。设计 L18 (36)的正交试验,如表3所示。

表3 正交试验

Table 3 Orthogonal experimental

水平	因素					
	基坑深度/ m	降水水位/ m	长宽比	立柱间隔/ m	立柱长/ m	立柱直径/ m
1	20	8.000	1	10	35	1
2	25	10.000	4	14	40	2
3	30	12.000	8	18	45	3

基坑内部立柱隆起变形影响因素模拟结果如图9,10所示,可知基坑内部立柱隆起变形影响因素的顺序是基坑深度>地下水位>立柱直径>长宽比>立柱间隔>立柱长,基坑深度和地下水位对立柱隆起影响最为显著。

基坑内部坑底土体变形影响因素模拟结果如

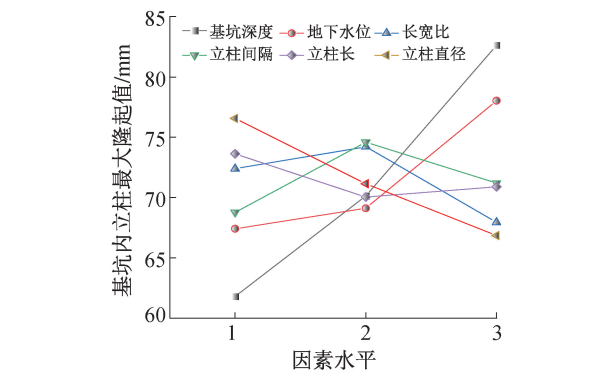


图9 基坑立柱变形敏感因素分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of influencing factors on foundation excavation column deformation

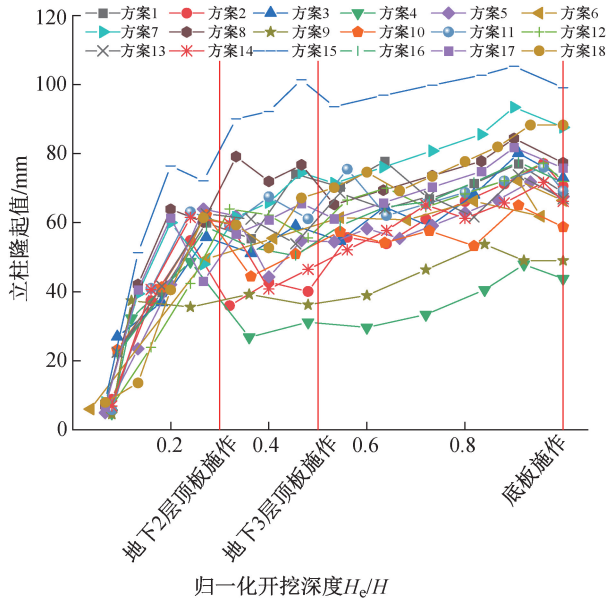


图10 立柱隆起值与归一化开挖深度的关系

Fig. 10 Relationship between column heave and normalized excavation depth

图11,12所示,坑底土体隆起变形影响因素的顺序是基坑深度>立柱间隔>地下水位>立柱直径>立柱长>长宽比,其中仅立柱直径与隆起量呈负相关,其余5项因素均表现为正相关特性。减小立柱间隔或增大立柱直径能有效提升桩土体系的等效刚度与相互作用强度,从而显著抑制由开挖卸荷诱发的回弹变形;而及时的降水措施则通过降低饱和度以提高土体有效应力及抗剪强度,并诱发不透水层产生渗流固结,在双重机制作用下进一步削减坑底隆起量。此外,隆起变形在空间分布上表现出显著的“边角效应”,即紧邻地下连续墙区域的土体变形响应最为剧烈,随距离增加而迅速衰减,据此可将基坑底部划分为强影响区(0~0.07L)、中影响区(0.07L~0.14L)及弱影响区(0.14L~0.5L)3个明

显的梯度范围。

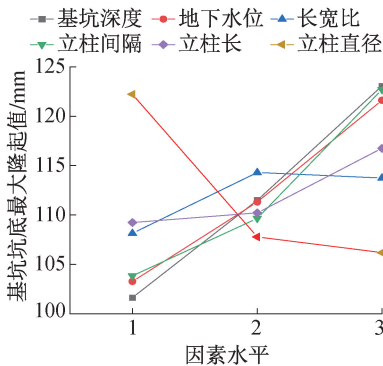


图 11 基坑坑底隆起值的敏感因素分析

Fig. 11 Sensitivity analysis of influencing factors on basal heave of the foundation excavation

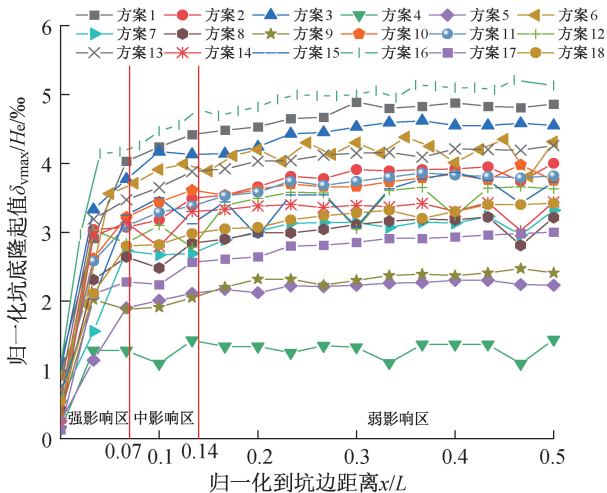


图 12 基坑坑底隆起值与归一化到坑边距离的关系

Fig. 12 Relationship between basal heave of the foundation excavation and normalized distance to excavation edge

根据上述分析可知开挖深度、地下水对基坑隆起有重要影响。现场统计显示7月份土方开挖总量为276 080m³，日均开挖量约8 900m³，基坑1个月土方标高平均降低约9.23m，如此大体量土方短时间开挖必然引起回弹变形量变大；而8月份日均开挖量约5 200m³，立柱隆起相对7月平均60mm要小很多，因此大体量土方快速开挖是6月—7月立柱隆起异常的主要原因之一。此外查阅气象资料获知北京2021年7月降水量为1951年以来同期最多，达到400.4mm，比常年偏多7成，降水日达20d，比常年多1倍，7月超常规降雨带来的地下水位变化也是引起立柱隆起异常的主要原因之一。

4 结语

1)北京某交通枢纽站超大深基坑开挖回弹变形表现出三阶段特征：早期开挖后快速回弹，立柱最大隆起超90mm；中期逆作板施工后回弹变缓或

以沉降为主；后期随地下3土层开挖持续回弹，立柱隆起小于30mm，早期开挖立柱隆起量较普通基坑明显异常。

2)通过正交试验得到坑底土隆起变形影响因素的顺序是基坑深度>立柱间隔>地下水位>立柱直径>立柱长>长宽比，并根据隆起变形的空间分布规律将基坑底部划分为强影响区(0~0.07L)、中影响区(0.07L~0.14L)及弱影响区(0.14L~0.5L)3个梯度范围。

3)综合分析得出北京某站超大深基坑早期回弹变形异常原因：7月份短期内大量的深层土体移除直接导致坑底应力剧烈释放，而同期遭遇的历史极值强降雨通过大幅抬升地下水位及增强水力顶托作用，协同放大了土体回弹与立柱隆起的变形响应。施工过程中可通过减小开挖规模和及时降水来控制坑底回弹变形。

参考文献：

[1] 王曙光,李钦锐,李建民.地基回弹变形计算若干问题探讨[J]. 土木工程学报,2020,53(8):108-115.
WANG S G, LI Q R, LI J M. Discussion on some issues of resilient deformation calculation [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(8): 108-115.

[2] 庞欢,浮朝晖,陈奎,等.深基坑开挖过程中既有管线保护措施及变形机理分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(13):44-50.
PANG H, FU Z H, CHEN K, et al. Protection measures of deep foundation excavation to existing pipeline and deformation mechanism analysis [J]. Construction technology, 2025, 54(13): 44-50.

[3] 曹力桥.软土地区深基坑开挖坑底隆起的有限元分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2): 819-824.
CAO L Q. Finite element analysis of basal heave induced by deep excavation in soft soil areas [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(S2): 819-824.

[4] 夏曾银,郑刚,邓旭,等.天津某半逆作法基坑结构柱隆起变形实测分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(5):657-664,790.
XIA Z Y, ZHENG G, DENG X, et al. Analysis on heave deformation of columns for excavation with semi top-down method in Tianjin [J]. Journal of Xi' an University of Architecture & Technology (natural science edition), 2022, 54 (5): 657-664, 790.

[5] 董新军,黄建伟,王宁龙,等.深基坑开挖过程中立柱隆起问题数值模拟分析[J]. 施工技术(中英文),2024,53(1):61-68.
DONG X J, HUANG J W, WANG N L, et al. Numerical simulation analysis of column uplift in deep foundation excavation process [J]. Construction technology, 2024, 53(1): 61-68.

(下转第92页)