

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.090



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 非平衡堆载作用下基坑降水开挖地表沉降的空间效应

梁新欢<sup>1</sup>, 迟民良<sup>2</sup>, 何小辉<sup>1</sup>, 王安华<sup>1</sup>, 徐长节<sup>2,3</sup>, 杨开放<sup>2,4</sup>

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 南昌 330038; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 3. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013; 4. 浙大城市学院工程学院, 杭州 310015)

**摘要:**为研究非平衡堆载作用下地铁基坑降水开挖过程中不同特征剖面处地表沉降的空间效应特性,以南昌市某地铁车站基坑工程为背景,利用 PLAXIS 3D 建立三维数值模型进行模拟,模拟值与实测值吻合良好,验证了数值模拟的准确性。通过改变非平衡堆载大小和降水开挖工况,研究狭长基坑在分步降水开挖与一次性降水开挖情况下不同堆载作用对坑外地表沉降的影响规律,并进一步探讨坑外不同特征剖面地表沉降的空间效应特性。结果表明:受非平衡堆载影响,近堆载侧地表沉降大于远堆载侧;相较于一次性降水开挖工况,分步降水开挖工况下坑外各特征剖面处地表沉降值均更小;两种降水开挖工况下,非平衡堆载均弱化了近堆载侧地表沉降的空间效应,而对远堆载侧地表沉降空间效应的影响则相反,这与非平衡堆载和分段分层开挖的共同作用有关。  
**关键词:**基坑降水;地表沉降;空间效应;非平衡堆载;数值模拟

中图分类号: TU46 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)02-0121-09

## Spatial effect of surface settlement during excavation and dewatering under non-equilibrium loading

LIANG Xinhuan<sup>1</sup>, CHI Minliang<sup>2</sup>, HE Xiaohui<sup>1</sup>, WANG Anhua<sup>1</sup>, XU Changjie<sup>2,3</sup>, YANG Kaifang<sup>2,4</sup>

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330038, P. R. China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 3. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 4. School of Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the spatial effect characteristics of surface settlement at different characteristic profiles during dewatering excavation of subway pits under non-equilibrium loading, a subway station pit project

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(52238009); 江西省重点研发计划(20223BBG71018); 南昌轨道交通集团科研项目(2020HGKYB008)

作者简介: 梁新欢(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事基坑工程研究, E-mail: 1979118134@qq.com。

徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: 2557587237@qq.com。

Received: 2024-07-03

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52238009); Key Research and Development Program of Jiangxi Province (No. 20223BBG71018); Nanchang Rail Transit Group Research Project (No. 2020HGKYB008)

**Author brief:** LIANG Xinhuan (1981-), senior engineer, main research interest: foundation pit engineering, E-mail: 1979118134@qq.com.

XU Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: 2557587237@qq.com.

in Nanchang is taken as the background, and a three-dimensional numerical model is established with PLAXIS 3D for simulation. The simulated values demonstrate a strong correlation with the measured values, which verifies the efficacy of numerical simulation. By altering the magnitude of the non-equilibrium loading and dewatering excavation conditions, the impact of different loadings on the settlement outside the pit under step-by-step and one-time dewatering excavation conditions was studied. Additionally, the spatial effect characteristics of settlement at various characteristic profiles were analyzed. The spatial effects of surface settlement outside the pit under different non-equilibrium loading and dewatering schemes were discussed. The findings indicate that due to the influence of non-equilibrium loading, the settlement on the side close to the loading is greater than that on the side far from the loading. In comparison with the one-time dewatering excavation condition, the settlement values at each characteristic profile outside the pit are reduced under the step-by-step dewatering excavation condition. Under both dewatering excavation conditions, the non-equilibrium loading weakens the spatial effect of settlement on the side near the loading. Conversely, the effect on the spatial effect of the settlement on the side far from the loading is the opposite, which is related to the combined effect of non-equilibrium loading and segmented excavation.

**Keywords:** foundation pit dewatering; surface settlement; spatial effect; non-equilibrium loading; numerical simulation

近年来,随着城市交通的快速发展,地铁车站等地下结构广泛建设于城市建筑密集区<sup>[1]</sup>,深基坑开挖受到周围环境的严格制约。既有建筑物会造成基坑各侧堆载大小不同,即非平衡堆载<sup>[2]</sup>,受邻近非平衡堆载影响,基坑降水开挖将产生形式更为复杂的围护结构变形及坑外地表沉降,并有极大可能引起局部破坏。

学者们对非平衡堆载作用下的基坑变形及坑外地表沉降进行了相关研究,林刚等<sup>[3]</sup>对某非对称荷载基坑进行数值模拟,研究了非对称堆载情况下基坑两侧围护结构的变形及弯矩发展趋势;Xu等<sup>[4]</sup>模拟了4组不同不对称荷载下支护结构的变形和内力响应情况;孙志浩等<sup>[5-6]</sup>通过建立数值模型,分析了两侧荷载距离不同对支撑轴力及坑外地表沉降的影响;彭智佳等<sup>[7]</sup>以杭州某地铁车站为工程背景,对非平衡荷载作用下支撑的受力特性进行了研究。上述研究均未能总结出非平衡堆载作用下基坑及周边环境变形的空间效应。对于狭长形地铁车站基坑而言,施工引起的地表沉降具有显著的空间效应,基坑边角处墙体在相同条件下将受到过更多的约束作用<sup>[8]</sup>。朱殷航等<sup>[9]</sup>以上海某软土地层矩形基坑为例,对基坑开挖全过程进行模拟,系统分析了支护结构受力和变形的空间效应;王文正等<sup>[10]</sup>以太原市某深基坑工程为背景,分析同一基坑不同位置的变形规律及不同几何尺寸基坑的变形特点;曹明<sup>[11]</sup>以武汉某深基坑工程为例,分析了施工荷载不均匀分布等因素对深基坑施工过程中基坑空间效应的影响。

富水地区基坑降水可保证基坑内部安全的施工环境<sup>[12]</sup>,不同基坑降水方案在施工组织上各具优

势:一次性降水开挖能有效缩短施工周期,而分步降水开挖则有助于降低施工成本。然而,这些方案对基坑开挖过程中引发的基坑变形和坑外地表沉降的影响各不相同。李体康等<sup>[13]</sup>考虑基坑的降水及开挖工序,分析了基坑周边的渗流场变化、地面沉降等问题;王浩<sup>[14]</sup>以济南某地铁车站基坑为依托,分析了降水与不降水、不同降水方式下基坑及周边环境变形的基本规律;李曙光等<sup>[15]</sup>以苏州某深基坑项目为例,考虑一次性降水和分步降水两种工况,分析了基坑降水开挖过程中周围地表沉降、支撑轴力的变化规律;徐长节等<sup>[16]</sup>以杭州某超大基坑为研究背景,开展了分步降水开挖工况下临江超大基坑及周边环境变形规律研究。然而,针对富水地区不同降水开挖方案下非平衡堆载作用对基坑及周边环境变形空间效应的影响研究仍然较少。

笔者依托南昌某地铁车站基坑工程,利用 PLAXIS 3D 建立三维数值模型,开展分步降水开挖与一次性降水开挖两种工况的数值研究,分析非平衡堆载大小对坑外各特征剖面地表沉降的影响,探讨非平衡堆载和降水开挖方案对坑外地表沉降空间效应的影响。

## 1 工程概况

地铁车站基坑、内支撑及非平衡堆载平面布置情况如图 1 所示,基坑总长 238 m,基坑标准段宽 22.7 m,开挖深度约 16 m,端头井段宽 26.7 m,开挖深度约 18 m。基坑西南侧存在一栋已建居民住宅,层高为 3 m,共计 5 层,将对基坑开挖造成非平衡堆载影响。



表 1 土层分布及基本物理力学参数

Table 1 Soil layer distribution and basic physical and mechanical parameters

土层	层号	$\gamma/$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e$	$c/$ kPa	$\varphi/$ (°)	$E_{s1-2}/$ MPa	$k/$ (m/d)
填土	①	18.5	0.84	12	10	6.00	5
淤泥质土	② <sub>2</sub>	18.0	0.85	6	28	5.45	0.003
粉质黏土	③ <sub>1</sub>	18.8	1.07	9	26	3.56	0.004
细砂	③ <sub>2</sub>	19.6	0.87	6	24	5.00	15
中砂	③ <sub>3</sub>	19.7	0.74	5	25	6.97	40
粗砂	③ <sub>4</sub>	19.8	0.65	3	29	20.00	80
砾砂	③ <sub>5</sub>	20.0	0.66	3	28	24.50	100
圆砾土	③ <sub>6</sub>	20.5	0.68	6	29	24.50	120
强风化泥质粉砂岩	⑤ <sub>1</sub>	20.2	0.72	40	25	7.80	0.8
中风化钙质泥岩	⑤ <sub>2</sub>	23.4		50	30		0.1

注： $\gamma$ 为土体天然重度； $e$ 为土体天然孔隙比； $c$ 为土体黏聚力； $\varphi$ 为土体内摩擦角； $E_{s1-2}$ 为土体压缩模量； $k$ 为土体渗透系数。

0.2；破坏比 $R_f$ 取0.95；与模量应力水平相关的幂指数 $m$ 取0.65。

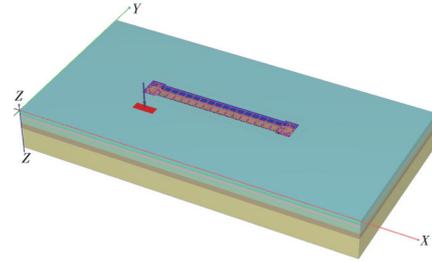


图 3 非平衡堆载基坑数值模型

Fig. 3 Numerical model of foundation pit with non-equilibrium loading

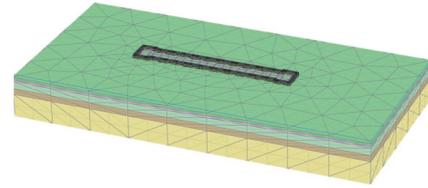


图 4 非平衡堆载模型网格划分

Fig. 4 Mesh of non-equilibrium loading numerical model

表 2 土层参数

Table 2 Soil layer parameters

土层	层号	标高/m	$E_{50}^{ref}/$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{oed}^{ref}/$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{ur}^{ref}/$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c'/$ kPa	$\varphi'/$ (°)	$G_0^{ref}/$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	$k/$ (m/d)
填土	①	-3.2	10 000	8 000	3 000	12	10	36 000	2	5
粉质黏土	③ <sub>1</sub>	-6.4	6 000	6 000	30 000	9	26	40 000	2	0.004
细砂	③ <sub>2</sub>	-8.6	13 200	11 000	33 000	6	24	90 000	2	15
粗砂	③ <sub>3</sub>	-16.2	25 000	25 000	75 000	3	29	150 000	2	40
圆砾土	③ <sub>6</sub>	-23.9	35 000	35 000	105 000	6	29	210 000	2	120
强风化泥质粉砂岩	⑤ <sub>1</sub>	-60.0				40	25		2	1

注： $E_{50}^{ref}$ 为标准三轴排水试验所得割线模量； $E_{oed}^{ref}$ 为固结试验的参考切线模量； $E_{ur}^{ref}$ 为三轴固结排水卸载再加载试验的参考卸载再加载模量； $c'$ 为土体有效黏聚力； $\varphi'$ 为土体有效内摩擦角； $G_0^{ref}$ 为小应变刚度试验的参考初始剪切模量； $\gamma_{0.7}$ 为 $G_s=0.722G_0$ 对应的剪切应变； $k$ 为土体渗透系数。

2.3 围护结构参数

建模过程中，地连墙用板单元模拟，土体与板单元之间用界面单元模拟，界面单元用莫尔-库伦本构模型模拟。界面单元强度参数使用临近土层强度参数，其强度折减因子 $R_{inter}$ 取0.65。透水性设置为不透水；钢筋混凝土支撑用梁单元模拟；钢支撑用锚杆单元模拟，支护结构参数取值依据相应的材料性质，如表3所示。

2.4 施工步骤

基坑降水采用开挖前一次性降水方案和分步

表 3 支护结构参数

Table 3 Parameters of supporting structure

围护结构	单元	$E/GPa$	$\nu$	$EA/(kN/m^2)$
地连墙	板单元	35	0.20	
砼支撑	梁单元	30	0.20	
钢支撑	锚杆	206	0.15	$7.5 \times 10^6$

注： $E$ 为弹性模量； $\nu$ 为支护泊松比； $EA$ 为轴向刚度。

降水开挖方案，以一次性降水开挖方案为例，即一次性将坑内水位降至坑底以下1m，之后分段分步开挖并架设支撑至坑底。通过设置相应土层的水头值来实现基坑降水操作。参照实际工况开挖方案，数值模型共分6层开挖，每层开挖均分6段施工，分段策略为从左至右（即先开挖 $k_1-k_1'$ 位置，后开挖 $k_3-k_3'$ 位置），并施作支护结构。基坑开挖和支护结构施工采用冻结相应土层并激活相应结构单元的方法实现，非平衡堆载施加采用面荷载方法实现。具体模拟步骤如表4所示。

2.5 结果验证

图5为分步降水开挖工况下基坑中心位置地表沉降模拟值与实测值的对比，其中纵坐标为地表沉降，单位mm；横坐标为距地连墙距离，单位m。如图5所示，地表沉降形式与实测数据基本一致，均为“拱肩”型，峰值均出现在坑外5~10m范围内，随着距地连墙距离的进一步增加，地表沉降值逐渐减小

表 4 数值模型模拟步骤

Table 4 Numerical model simulation steps

步骤	内容
1	初始地应力平衡,施加非平衡堆载
2	打设地连墙至-26.0 m
3	降水至-17.0 m(坑底以下1.0 m处)
4	开挖至-1.5 m,冠梁及钢混支撑施工
5	开挖至-5.0 m
6	开挖至-8.0 m,并施工第1道钢支撑
7	开挖至-11.5 m,并施工第2道钢支撑
8	开挖至-14.0 m
9	开挖至坑底(-16.0 m处)

并趋于0。整体而言,地表沉降模拟值略大于实际监测值,分步开挖工况下基坑中心位置两侧地表沉降峰值模拟值分别为12.68、10.94 mm,实测地连墙峰值分别为12.40、10.21 mm,相差较小,且监测点范围内均拟合较好,验证了数值模型的准确性。

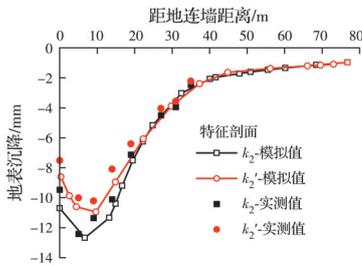


图 5 基坑中心位置地表沉降模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between simulated and measured values of surface settlement at the center of the foundation pit

### 3 不同降水方案的地表沉降响应

为研究狭长基坑在分步降水开挖与一次性降水开挖情况下不同非平衡堆载作用对抗外地表沉降空间效应的影响规律,通过改变坑外一侧的非平衡堆载大小,研究不同工况下坑外不同特征剖面处的地表沉降分布(地表沉降大小及影响范围)情况。在基坑长边两侧标准段各取3个特征剖面( $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ )、端头井段取2个特征剖面( $k_0$ 、 $k_4$ ),其中 $k_0$ 和 $k_1$ 为非平衡堆载范围内特征剖面, $k_0'$ 、 $k_1'$ 、 $k_2'$ 、 $k_3'$ 、 $k_4'$ 为远堆载侧的对应位置,如图6所示。具体工况如表5所示。

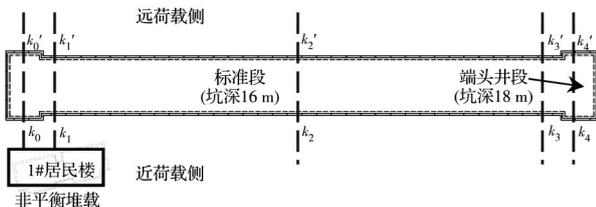


图 6 特征剖面与非平衡堆载示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the characteristic sections and the non-equilibrium loading positions

表 5 地表沉降响应研究工况

Table 5 Surface settlement response conditions

工况	开挖类型	特征剖面	非平衡堆载值/kPa
I	一次性降水开挖	$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_0', k_1', k_2', k_3', k_4'$	50, 75, 100
II	分步降水开挖	$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_0', k_1', k_2', k_3', k_4'$	50, 75, 100

#### 3.1 一次性降水开挖

图7为当非平衡堆载为50 kPa时一次性降水开挖基坑两侧坑外地表沉降响应规律。由图7可以看出,坑外地表沉降均为“拱肩”型, $k_2$ 特征剖面处地表沉降值最大,这是由于 $k_2$ 为基坑长边中心位置,受到的基坑转角效应最小。近堆载侧特征剖面 $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 处的地表沉降峰值分别为7.59、12.95、13.81、9.81、5.27 mm;远堆载侧特征剖面 $k_0'$ 、 $k_1'$ 、 $k_2'$ 、 $k_3'$ 、 $k_4'$ 处的地表沉降峰值分别为6.87、12.06、13.83、9.90、5.76 mm。由此可见,对于基坑近堆载侧相同空间位置的 $k_1$ 和 $k_3$ ,非平衡堆载的作用使得 $k_1$ 特征剖面处的地表沉降值更大,增长了32.01%, $k_0$ 处地表沉降值则相对于 $k_4$ 增长了44.02%;对于基坑远堆载侧相同空间位置的 $k_1'$ 和 $k_3'$ , $k_1'$ 特征剖面处地表沉降值同样有所增长,增长了21.82%。

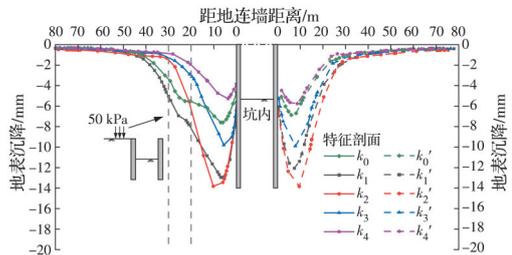


图 7 一次性降水开挖地表沉降(50 kPa)

Fig. 7 Surface settlement under one-time dewatering excavation condition (50 kPa)

对比相同特征剖面近堆载侧和远堆载侧的地表沉降值可以发现,非平衡堆载对 $k_0$ 和 $k_1$ 特征剖面处的地表沉降影响最显著,近堆载侧较远堆载侧地表沉降分别增长了10.48%和7.38%,而对特征剖面 $k_2$ 、 $k_3$ 和 $k_4$ 影响较小。另外,在 $k_0$ 和 $k_1$ 特征剖面处,坑外20~40 m范围内出现了地表沉降增长现象,非平衡堆载中心(坑外25 m)地表沉降分别达到4.46、6.93 mm。

图8和图9分别为非平衡堆载为75、100 kPa时一次性降水开挖基坑两侧坑外地表沉降响应规律。可以看出,坑外地表沉降值较50 kPa时更大。通过对比近堆载侧对称位置(如 $k_1$ 与 $k_3$ )地表沉降值可以发现,与非平衡堆载50 kPa时情况相似,非平衡堆载的作用使基坑近堆载侧对称位置均产生约30%的沉降差值,而对远堆载侧对称位置(如 $k_1'$ 与 $k_3'$ )

的影响规律则不尽相同,这与非平衡堆载和分段分层开挖的共同作用有关;通过对比相同特征剖面近堆载侧和远堆载侧的地表沉降值可以发现,非平衡堆载对 $k_0-k_0'$ 和 $k_1-k_1'$ 特征剖面处的地表沉降影响均最显著,且随着非平衡堆载值的增大,近堆载侧较远堆载侧地表沉降增长幅度有所增大,以 $k_1-k_1'$ 剖面为例,增长幅度从7.38%增大至18.33%。此外,与非平衡堆载50 kPa时情况不同,在非平衡堆载影响范围内的 $k_0$ 和 $k_1$ 特征剖面处,非平衡堆载中心位置(坑外25 m)地表沉降均显著增大,当非平衡堆载为75 kPa时, $k_0$ 特征剖面非平衡堆载中心位置地表沉降大于沉降槽主要影响区峰值;当非平衡堆载为100 kPa时, $k_0$ 和 $k_1$ 特征剖面非平衡堆载中心位置地表沉降均大于沉降槽主要影响区峰值,故当非平衡堆载较大时,应密切监测紧邻建(构)筑物周边地表沉降。

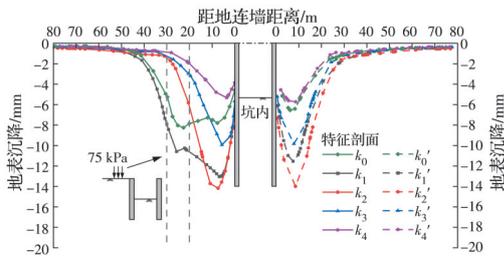


图 8 一次性降水开挖地表沉降 (75 kPa)

Fig. 8 Surface settlement under one-time dewatering excavation condition (75 kPa)

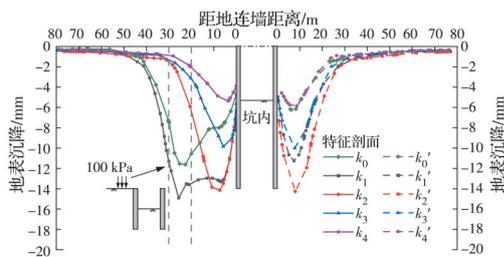


图 9 一次性降水开挖地表沉降 (100 kPa)

Fig. 9 Surface settlement under one-time dewatering excavation condition (100 kPa)

### 3.2 分步降水开挖

图 10 为当非平衡堆载为 50 kPa 时分步降水开挖基坑两侧坑外地表沉降响应规律。由图 10 可以看出,坑外地表沉降分布形式与一次性降水开挖相似,但沉降值均更小。近堆载侧特征剖面 $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 处的地表沉降峰值分别为 5.19、10.33、10.93、8.38、5.16 mm;远堆载侧特征剖面 $k_0'$ 、 $k_1'$ 、 $k_2'$ 、 $k_3'$ 、 $k_4'$ 处的地表沉降峰值分别为 4.08、7.06、9.68、7.60、4.61 mm。可以看出,对于基坑近堆载侧相同空间位置的 $k_1$ 和 $k_3$ ,非平衡堆载的作用使 $k_1$ 特征剖面处的地表沉降值更大,增长了 23.27%;对于基坑

远堆载侧相同空间位置的 $k_1'$ 和 $k_3'$ , $k_1'$ 特征剖面处地表沉降值则有所降低,降低了 7.11%,说明分步降水开挖情况下,非平衡堆载对堆载范围内两侧地表沉降作用相反。

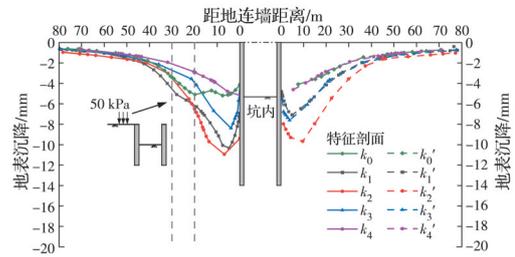


图 10 分步降水开挖地表沉降 (50 kPa)

Fig. 10 Surface settlement under step-by-step dewatering excavation condition (50 kPa)

通过对比相同特征剖面的近堆载侧和远堆载侧的地表沉降值可以发现,非平衡堆载对 $k_1$ 特征剖面处的地表沉降影响最为显著,近堆载侧较远堆载侧地表沉降增长了 43.32%,而对其他特征剖面影响较小。另外,在 $k_0$ 和 $k_1$ 特征剖面处,坑外 20~40 m 范围内出现了地表沉降增长现象,非平衡堆载中心位置处(坑外 25 m)地表沉降分别达到 2.43、5.62 mm。

图 11 和图 12 分别为当非平衡堆载为 75、100 kPa 时分步降水开挖基坑两侧坑外地表沉降响应规律。可以看出,坑外地表沉降值较 50 kPa 时更大。随着非平衡堆载值的增大,基坑近堆载侧对称位置(如 $k_1$ 与 $k_3$ )的沉降差值逐渐增大,而对远堆载侧对称位置(如 $k_1'$ 与 $k_3'$ )的影响规律则相反,这与非平衡堆载和分段分层开挖的共同作用有关;非平衡堆载对 $k_0-k_0'$ 和 $k_1-k_1'$ 特征剖面处的地表沉降影响均较显著,且随着非平衡堆载值的增大,近堆载侧较远堆载侧地表沉降增长幅度有所增大,以 $k_1-k_1'$ 剖面为例,增长幅度从 43.32% 增大至 57.46%。另外,当非平衡堆载为 75 kPa 时, $k_0$ 特征剖面非平衡堆载中心地表沉降大于沉降槽主要影响区峰值,故当非平衡堆载较大时,应密切监测紧邻建(构)筑物周边的地表沉降。

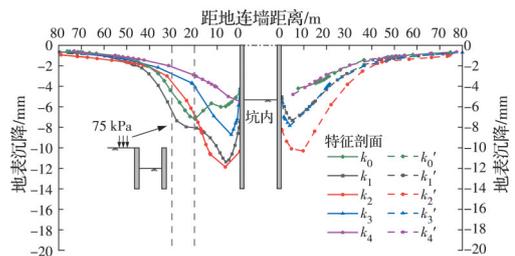


图 11 分步降水开挖地表沉降 (75 kPa)

Fig. 11 Surface settlement under step-by-step dewatering excavation condition (75 kPa)

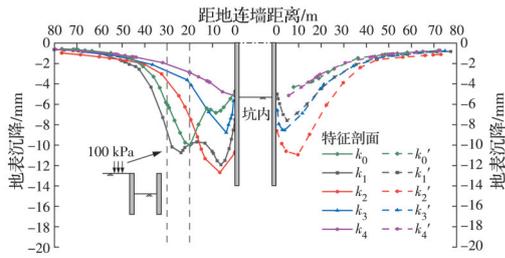


图 12 分步降水开挖地表沉降 (100 kPa)

Fig. 12 Surface settlement under step-by-step dewatering excavation condition (100 kPa)

### 3.3 地表沉降空间效应

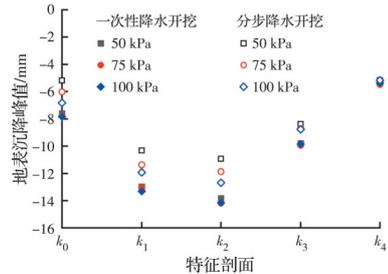
非平衡堆载作用下,狭长形地铁车站基坑施工引起的地表沉降存在明显的空间效应,基坑边角处墙体受到坑角约束作用,地表沉降值明显小于基坑中部位置。由图 7~图 12 可以看出,两种降水开挖方案下,地表沉降形式均为“拱肩”型,故取各特征剖面地表沉降峰值来对比非平衡堆载作用下不同降水开挖方案下地表沉降的空间效应(如图 13 所示)。图 13 中, $k_0$ 和 $k_1$ 为非平衡堆载作用范围内端头井段与标准段的对称位置, $k_4$ 和 $k_3$ 则为与之对应的另一端头井段的特征剖面,具体位置如图 6 所示。从图 13 可以看出:

1)相较于分步降水开挖工况,一次性降水开挖工况下坑外不同特征剖面处的地表沉降峰值均更大。这是由于一次性降水过程在墙顶支撑架设之前,曾超峰<sup>[24]</sup>的研究表明,无撑降水将导致地连墙发生显著的“悬臂型”侧移,并进一步导致显著的坑外地表沉降。

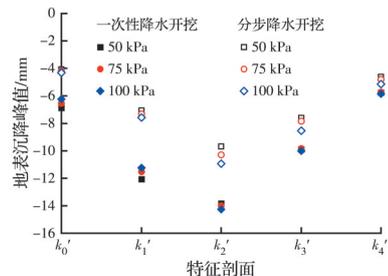
2)一次性降水开挖工况下基坑近堆载侧 $k_1$ 和远堆载侧 $k_1'$ 的地表沉降峰值均大于同侧较远端( $k_3$ 和 $k_3'$ ),更接近基坑标准段中间位置 $k_2$ 剖面(即非平衡堆载作用使得堆载作用范围内空间效应有所减弱);分步降水开挖工况下,基坑近堆载侧 $k_1$ 地表沉降峰值大于同侧较远端 $k_3$ ,而远堆载侧 $k_1'$ 的地表沉降峰值则小于同侧较远端 $k_3'$ (即非平衡堆载作用使得堆载作用范围内远堆载侧空间效应有所增强)。

非平衡堆载情况下两种降水开挖方案的地表沉降在远堆载侧存在差异(即两种降水开挖方案情况下远堆载侧地表沉降空间效应形式不同),这是因为:首先,非平衡堆载所产生的挤土作用使得基坑朝远堆载侧移动,对远堆载侧土体产生“推回”作用,进而使得 $k_1'$ 剖面处地表沉降值相对于 $k_3'$ 剖面处更小;其次,由于本地铁车站较长(238 m),开挖方案采用分段分层开挖,基坑分段策略为从左至右(即先开挖 $k_1-k_1'$ 位置,后开挖 $k_3-k_3'$ 位置),对于较后进行分段开挖的基坑段,最大墙体侧移被减小的程度更大<sup>[25]</sup>,故受分段开挖影响, $k_1'$ 剖面处挡墙侧移

值大于 $k_3'$ 处,进而使得 $k_1'$ 剖面处地表沉降相对于 $k_3'$ 剖面处更大。由此可见,一次性降水开挖工况下,非平衡堆载产生的挤土作用小于分段分层开挖的影响,故远堆载侧 $k_1'$ 的地表沉降峰值大于同侧较远端 $k_3'$ 处(地表沉降空间效应减弱);而分层降水开挖工况下则相反,非平衡堆载产生的挤土作用更加凸显,故远堆载侧 $k_1'$ 的地表沉降峰值小于同侧较远端 $k_3'$ 处(地表沉降空间效应增强)。



(a) 近堆载侧



(b) 远堆载侧

图 13 不同降水开挖工况下地表沉降峰值  
Fig. 13 Peak values of surface settlement under different dewatering excavation conditions

## 4 结论

对南昌某地铁车站基坑工程进行三维数值模拟,模拟值与实测值吻合良好。基于数值模拟结果开展了两种降水开挖工况的研究,分析了非平衡堆载大小对坑外各特征剖面地表沉降的影响,探讨了非平衡堆载和降水开挖方案对坑外地表沉降空间效应的影响,得出以下结论:

1)狭长形地铁车站基坑施工引起的地表沉降具有显著空间效应,基坑边角处墙体受到坑角约束作用,地表沉降值显著小于基坑中部,受非平衡堆载影响,近堆载侧地表沉降值大于相同剖面远堆载侧。随着非平衡堆载值的增大,基坑两侧地表沉降值均增大,当堆载值达到 75 kPa 时,堆载中心位置地表沉降值将超过沉降槽主要影响区峰值,需密切监测紧邻建(构)筑物周边的地表沉降。

2)相较于一次性降水开挖工况,分步降水开挖工况下坑外各特征剖面处地表沉降值均更小,分步降水开挖能够有效抑制坑外地表沉降。

3)对于近堆载侧,两种降水开挖工况下,非平衡堆载均弱化了基坑两侧地表沉降的空间效应,使得基坑近堆载侧端头井段附近 $k_0$ 和 $k_1$ 剖面的地表沉降值更大,更接近标准段中间位置 $k_2$ 剖面。

4)对于远堆载侧,一次性降水开挖工况下,非平衡堆载产生的挤土作用小于分段分层开挖的影响,从而弱化了基坑远堆载侧的空间效应,而分步降水开挖工况下,非平衡堆载产生的挤土作用更显著,相应地增强了基坑远堆载侧的空间效应。

值得注意的是,研究中将坑外既有建筑物简化为面荷载,未考虑建筑物群桩基础的水土阻隔效应<sup>[26]</sup>,未来可开展精细化数值模拟,探讨紧邻群桩基础对坑外地表沉降空间效应的影响。同时,针对复杂环境下坑外地表沉降的空间效应特征,应进一步开展相关控制方案研究,如内隔墙局部支挡技术<sup>[27]</sup>等。

#### 参考文献

- [1] 徐长节,徐礼阁,孙凤明,等.深基坑承压水的风险控制及处理实例[J].岩土力学,2014,35(增刊1):353-358.  
XU C J, XU L G, SUN F M, et al. Risk control and treatment of confined water in deep foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup 1): 353-358. (in Chinese)
- [2] 石钰锋,阳军生,白伟,等.紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):826-833.  
SHI Y F, YANG J S, BAI W, et al. Analysis of field testing for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pit's enclosure structure close to railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 826-833. (in Chinese)
- [3] 林刚,徐长节,蔡袁强.不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J].岩土力学,2010,31(8):2592-2598.  
LIN G, XU C J, CAI Y Q. Research on characters of retaining structures for deep foundation pit excavation under unbalanced heaped load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592-2598. (in Chinese)
- [4] XU C J, XU Y L, SUN H L, et al. Characteristics of braced excavation under asymmetrical loads [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 452534.
- [5] 孙志浩,雷菲菲,薛文静,等.非对称荷载下内撑式基坑受力变形分析[J].科学技术与工程,2021,21(24):10222-10228.  
SUN Z H, LEI F F, XUE W J, et al. Stress and deformation analysis of internal bracing foundation pit under asymmetric load [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(24): 10222-10228. (in Chinese)
- [6] 孙志浩,张兴周,葛佳佳,等.不同荷载距离下内撑式不平衡基坑受力变形分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2022,58(6):735-743.  
SUN Z H, ZHANG X Z, GE J J, et al. Stress and deformation analysis of an unbalanced foundation pit with a braced retaining structure under different load distances [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(6): 735-743. (in Chinese)
- [7] 彭智佳,刘文涛,胡林浩,等.非平衡荷载下地铁车站深基坑支撑结构力学特性研究[J].路基工程,2021(5):198-202.  
PENG Z J, LIU W T, HU L H, et al. Study on mechanical properties of supporting structure of deep foundation pit in subway station under non-equilibrium load [J]. Subgrade Engineering, 2021(5): 198-202. (in Chinese)
- [8] 杨雪强,刘祖德,何世秀.论深基坑支护的空间效应[J].岩土工程学报,1998,20(2):74-78.  
YANG X Q, LIU Z D, HE S X. On the spatial effect of deep foundation pit support [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 74-78. (in Chinese)
- [9] 朱殷航,徐中华,王卫东,等.软土地层超深基坑支护结构变形特性三维分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(增刊2):767-777.  
ZHU Y H, XU Z H, WANG W D, et al. Three-dimensional analysis of deformation characteristics of supporting structure of ultra-deep foundation pit in soft soil stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(Sup 2): 767-777. (in Chinese)
- [10] 王文正,张艳秋,李栋,等.考虑空间效应的深基坑变形特性研究[J].山西建筑,2024,50(10):1-5.  
WANG W Z, ZHANG Y Q, LI D, et al. Research on deformation characteristics of deep foundation pit considering spatial effects [J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(10): 1-5. (in Chinese)
- [11] 曹明.土压力不平衡条件下深基坑空间效应研究[J].土工基础,2024,38(1):71-75.  
CAO M. Spatial effect of deep excavation under unbalanced earth pressures [J]. Soil Engineering and Foundation, 2024, 38(1): 71-75. (in Chinese)
- [12] 郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(1):1-36,201.  
ZHENG G. Method and application of deformation control of excavations in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36, 201. (in Chinese)
- [13] 李体康,王媛.渗流应力耦合作用下深基坑开挖变形性状分析[J].水电能源科学,2013,31(5):126-129,83.  
LI T K, WANG Y. Numerical analysis of deep foundation pit deformation considering coupled hydromechanical effects [J]. Water Resources and Power, 2013, 31

- (5): 126-129, 83. (in Chinese)
- [14] 王浩. 地铁车站深大基坑降水开挖变形特性研究[D]. 山东 青岛: 山东科技大学, 2020.  
WANG H. Study on deformation characteristics of deep and large foundation pit dewatering excavation in subway station [D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [15] 李曙光, 吴应明, 王洪坤. 富水软土地区不同降水开挖工况下深基坑变形研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 26-31.  
LI S G, WU Y M, WANG H K. Deformation of deep foundation excavation under different precipitation excavation conditions in water-rich soft land areas [J]. Construction Technology, 2022, 51(1): 26-31. (in Chinese)
- [16] 徐长节, 迟民良, 杨开放, 等. 江水位及插入比对临江超大基坑变形的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6): 1189-1198.  
XU C J, CHI M L, YANG K F, et al. Influence of water level and insertion ratio on the deformation of ultra-large foundation pit adjacent to river [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(6): 1189-1198. (in Chinese)
- [17] 曾超峰, 孙海昱, 薛秀丽, 等. 多含水层体系基坑抽水诱发邻近建筑桩基受力变形特性[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 164-173, 183.  
ZENG C F, SUN H Y, XUE X L, et al. Responses of adjacent building pile foundation to dewatering in multi-aquifer system [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 164-173, 183. (in Chinese)
- [18] 曾超峰, 蔡钢, 朱龙, 等. 考虑既有地铁车站阻隔效应的基坑抽水致沉模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2566-2577.  
ZENG C F, CAI G, ZHU L, et al. Laboratory-scale model test on settlement incurred by foundation pit dewatering considering the barrier effect of pre-existing metro station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2566-2577. (in Chinese)
- [19] YANG K F, XU C J, CHI M L, et al. Analytical analysis of the groundwater drawdown difference induced by foundation pit dewatering with a suspended waterproof curtain [J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10301.
- [20] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.  
WANG W D, WANG H R, XU Z H. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1766-1774. (in Chinese)
- [21] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.  
GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845. (in Chinese)
- [22] BRINKGREVE R B J, ENGIN E, SWOLFS W M, et al. PLAXIS 3D 2013 user's manuals [M]. Delft: The Netherlands: Plaxis BV, 2013.
- [23] 王凌, 张声宇, 张跃明, 等. 南昌河流阶地内地铁车站基坑变形研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 31-40.  
WANG L, ZHANG S Y, ZHANG Y M, et al. Study on deformation of deep excavation for metro stations in river terraces in Nanchang [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 31-40. (in Chinese)
- [24] 曾超峰. 工程降水引起基坑及土体变形机理、规律及控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
ZENG C F. Study on deformation mechanism, law and control strategy of foundation pit and soil caused by engineering dewatering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [25] 舒魏碧章. 地铁深基坑工程阶梯式分段分层开挖空间效应的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
SHU W B Z. Study on spatial effect of step-by-step, subsection and layered excavation in deep foundation pit engineering of subway [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [26] 曾超峰, 张祖浩, 高文华, 等. 坑外群桩阻隔效应对基坑内抽水引发变形影响机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2378-2386.  
ZENG C F, ZHANG Z H, GAO W H, et al. Barrier effects of surrounding group piles on deformation of foundation pits induced by dewatering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2378-2386. (in Chinese)
- [27] 曾超峰, 王硕, 宋伟伟, 等. 内隔墙对开挖前抽水引发软土区地铁深基坑变形的控制效果[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1277-1286.  
ZENG C F, WANG S, SONG W W, et al. Control effect of cross walls on metro foundation pit deformation induced by pre-excavation dewatering in soft soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1277-1286. (in Chinese)