

软土地质条件下竖井开挖仿真研究

凌 涛¹, 董志红¹, 谢永亮¹, 吕晓江¹, 彭学军²

(1. 中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 4100001; 2. 中铁五局集团第一工程有限责任公司, 湖南 长沙 410117)

摘要: 为了研究不同条件下竖井开挖时土体的变形情况, 以长沙地铁某竖井工程为研究对象, 采用有限元软件 PLAXIS 3D 建立模型, 分析开挖后土体的沉降情况以及外部载荷大小对竖井的影响。结果表明: 1) 在竖井开挖过程中, 土体的形变面积自上而下逐渐减小, 其中地表土层的形变面积最大; 2) 竖井周围土壤的变形主要集中在上部土层; 3) 在竖直方向上, 随着深度增加, 土体的位移量呈现先增加后减小的趋势, 当竖井底部位于黏土土质时, 位移量可达最大值, 约为 60 mm; 4) 外部载荷的增加对基坑底部的影响较小, 当载荷达到 60 kN/m² 时, 其影响范围扩展至竖井底部 3 倍宽度范围内, 导致地表位移 100 ~ 110 mm; 当外部载荷增至 80 kN/m² 时, 最大载荷位置出现在载荷面, 地表位移可达 130 ~ 140 mm; 5) 最大位移量随载荷距离的增加而减小, 当载荷距离为 6 m 时, 载荷位置对排桩影响很小。本文研究成果可为实际竖井施工提供理论指导。

关键词: 竖井; 软土; 基坑开挖; 三维有限元

中图分类号: TD926.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)03-0025-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.03.032

Simulation research of shaft excavation under soft soil conditions

LING Tao¹, DONG Zhihong¹, XIE Yongliang¹, LÜ Xiaojiang¹, PENG Xuejun²

(1. China Railway No. 5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 4100001, Hunan, China;

2. Railway No. 5 Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Changsha 410117, Hunan, China)

Abstract: In order to study the deformation of soil body during shaft excavation under different conditions, a shaft project of Changsha Metro is taken as the research object, and the finite element software PLAXIS 3D is used to establish a model, and the settlement of the soil body after excavation and the influence of external load on the shaft are analyzed. The results show that: 1) During the shaft excavation, the deformation area of the soil body gradually decreases from top to bottom, and the deformation area of the surface soil layer is the largest. 2) The deformation of the soil around the shaft is mainly concentrated in the upper soil layer; 3) In the vertical direction, as the depth increases, the displacement of the soil body tends to increase first and then decrease. When the bottom of the shaft is located in clay soil, the displacement can reach the maximum value, about 60 mm; 4) The increase of external load has little impact on the bottom of the foundation pit. When the load reaches 60 kN/m², the influence range extends to 3 times the width of the bottom of the shaft, resulting in a surface displacement of 100 ~ 110 mm. When the external load increases to 80 kN/m², the maximum load position appears on the load surface, and the surface displacement can reach 130 ~ 140 mm; 5) The maximum displacement decreases with the increase of the load distance, and when the load distance is 6 m, the load position has little influence on the row pile. The results can provide a theoretical basis for the actual shaft construction.

Key words: shaft; soft soils; foundation pit excavation; three-dimensional finite element

我国的基础设施建设正在快速发展, 特别是在 软土地区的城市建设领域取得了显著进展。经过几

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074116;52004088)

作者简介: 凌 涛(1988—), 男, 高级工程师, 从事地铁施工支护技术方面的工作。

十年的发展, 地下工程的规模和数量都呈现惊人的增长趋势。尽管与地下工程相关的科学理论和实际技术日益成熟, 但其中仍然存在挑战, 尤其是在处理软土地层的地质问题上^[1-3]。为了优化开挖过程, 许多学者进行了研究, 如: 朱剑钦^[4]运用有限元软件 ABAQUS 分析了软土地区基坑开挖时的超静孔隙水压力, 发现基坑开挖卸荷会在坑底及周围土体中产生负超静孔隙水压力, 导致挡墙前后的有效土压力降低, 特别是在挡墙附近受到超载作用时, 会导致基坑中的负超静孔隙水压力绝对值减小; 郭玉君等^[5]研究发现, 随着基坑开挖深度的增加, 支护结构的水平位移逐渐增大, 而位于基坑附近的管道, 在距离基坑边缘较远的位置, 其水平位移会减小, 此外, 基坑附近建筑物拐角处的沉降量随开挖深度的增加而增加, 但会随距离基坑边缘距离的增加而减少; 曾森华等^[6]研究了开挖过程中围护结构、邻近市政道路以及建筑物的变形情况, 发现基坑围护结构表现出了安全可靠, 对邻近市政道路的影响较小, 但邻近建筑物的沉降差异较为显著, 且这种沉降倾向于出现在基坑开挖的区域; 蔡映坤等^[7]以昆明市河湖相软土地区为例, 分析了基坑开挖施工过程中的变形特征, 发现软土隆起对于地连墙的顶部位移和附近土体的沉降产生显著影响, 基坑周边土体的沉降和地连墙体的变形与基坑开挖引起的典型变形规律相吻合; 吴安康^[8]分析了软土地基对基坑开挖带来的危害, 讨论了软土层地基支护和桩基础施工的关键要点, 并提及了施工中所遇到的实际问题。本文以湖南省长沙市某地铁工程为研究对象, 运用 PLAXIS 3D 进行开挖过程的研究, 以期类似工程施工提供理论和技术指导。

1 工程概况

长沙地铁某车站附属工程 7 号出入口通过地下通道横穿万家丽道路与车站相连, 原设计采用暗挖 + 明挖方式, 其中暗挖段长度为 42.6 m, 明挖段长度为 23.3 m, 总长度为 65.9 m。由于明挖段施工地点位于高架桥下, 并且地下埋藏了众多管线, 施工环境极具挑战性, 东段明挖(23.3 m)变更为明挖 + 暗挖, 原明暗交接处的排烟竖井段(6.3 m)采取明挖法。竖井尺寸为 4.6 m × 5 m ×

13.1 m(长 × 宽 × 高), 主体围护结构采用围护桩, 没有额外的支撑结构, 详细示意如图 1 所示。

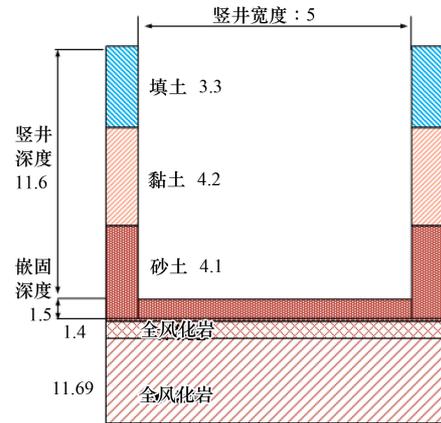


图 1 竖井截面

杂填土层厚度为 3.3 m, 黏土层厚度为 4.2 m, 砂土层厚度为 4.1 m, 强风化砂岩层厚度为 1.4 m, 中风化砂岩层厚度为 11.69 m。填土和黏土为竖井外侧土体的主要成分, 为 VI 级围岩, 稳定性较差。

2 数值模拟

采用有限元软件 PLAXIS 3D 构建竖井开挖过程的三维模型, 模型示例如图 2 所示。为了尽量减小计算误差, 对整个基坑进行建模, 模型的尺寸为 42 m × 35 m × 30 m(长 × 宽 × 高)。

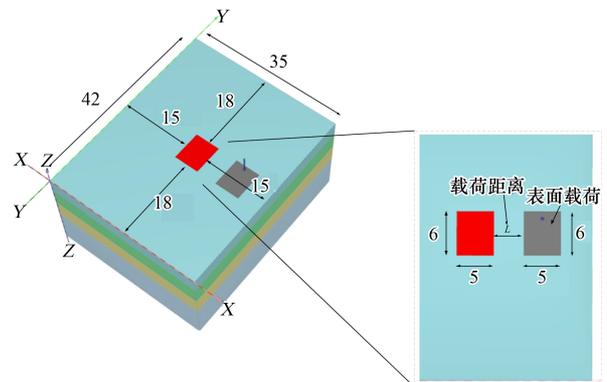


图 2 三维有限元模型

利用土体硬化本构模型描述土层的力学特性, 利用 Mohr-Coulomb 本构模型描述岩石层的材料特性。排桩采用板单元模拟, 板单元的相关参数由等刚度计算得出^[9-11], 结果如表 1 所示。利用界面强度折减系数描述土体与结构之间的强度关系, 填土层、砂土层和岩土层对应的界面强度折减系数分别为 0.75、0.70、1.00。各地层的物理力学参数如表 2、3 所示。

表 1 板单元参数

容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	等效厚度/m	剪切模量/GPa
25	30	0.2	1	12.5

表 2 土层的物理力学参数

土质名称	土壤厚度/m	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	割线模量/MPa	切线模量/MPa	卸载再加载模量/MPa
填土	0~3.3	18	14	12.0	7.50	7.50	22.50
黏土	3.3~7.5	17	8	13.2	6.11	6.11	18.33
砂土	7.5~11.6	18	3	39.8	8.90	8.90	26.70

表 3 岩石层的物理力学参数

土质名称	土壤厚度/m	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	弹性模量/MPa
强风化砂岩	11.6~13.0	21	0.34	80	45	200
中风化砂岩	13.0~30.0	26	0.35	900	42	4 140

通过对开挖部分的网格无关性分析发现,随着“高粗”、“粗”、“中等”网格粗细程度的变化,所监测的数值差范围在 5% 以内变化,且随着网格的细化越来越小,故可以使用“粗”网格来进行数值模拟。该网格包含 26 791 个节点,16 126 个单元。

3 结果分析

3.1 竖井开挖分析

为研究竖井开挖对土体位移的影响,设计载荷与竖井边距离为 4 m 的开挖工况,载荷面积为 $5\text{ m}\times 6\text{ m}$,载荷大小为 0。图 3 为竖井开挖后的总位移云图。由图 3 可知:在竖直方向上,特别是在排桩附近,位移明显增加,最大位移出现在竖井中段附近。在影响范围方面,地表受到的影响最为显著。随着深度的增加,竖井对土体的影响逐渐减小。竖井开挖后地表位移的影响区域呈现扩散状分布。位移分布在竖直方向上也呈现相似的规律,最大位移量出现在排桩附近。

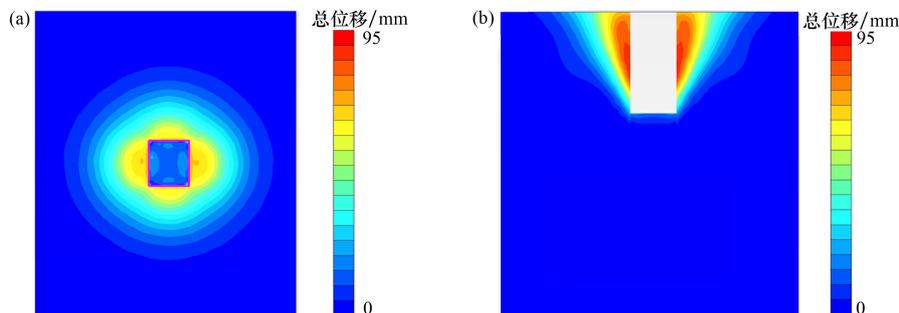


图 3 竖井开挖后的总位移云图

图 4 为排桩附近竖直方向上的水平偏移量。由图 4 可知:最大的偏移量出现在黏土区域。随着深度的增加,水平偏移呈现先增大后减小的趋势。图 5 为地表位移量与竖井边缘距离之间的关系。由图 5 可知,随着距离的增加,位移量随之减小。

3.2 载荷的影响

为研究地表载荷对竖井开挖的影响,设计载荷与竖井边距离为 4 m 的开挖工况,载荷面积为 $5\text{ m}\times 6\text{ m}$,载荷大小为 0、20、40、60、80 kN/m^2 。图 6 为不同载荷下竖直方向上的位移云图。由图 6 可知:在软土质土层条件下,不同载荷对地表有着明显的影响,而对基坑底影响很小。当载荷从 0 增加至 80 kN/m^2 时,基坑底一直保持很小的隆起,载荷侧的土体位移量明显大于无载荷侧;从载荷附近的位移云图可以看出,随着载荷的加大,载荷附近沉降量加大,更多区域开始出现沉降;当载荷达到 80 kN/m^2 时,最大位移位置由排桩附近转移到载荷附近。

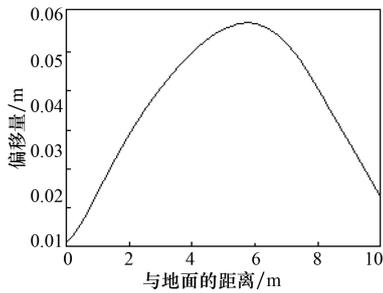


图 4 排桩附近竖直方向上土体的水平偏移量

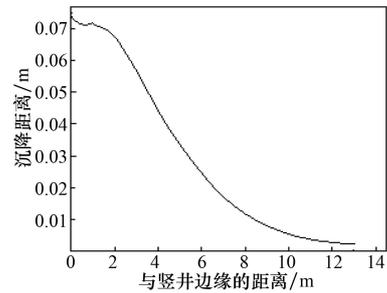


图 5 地表沉降量

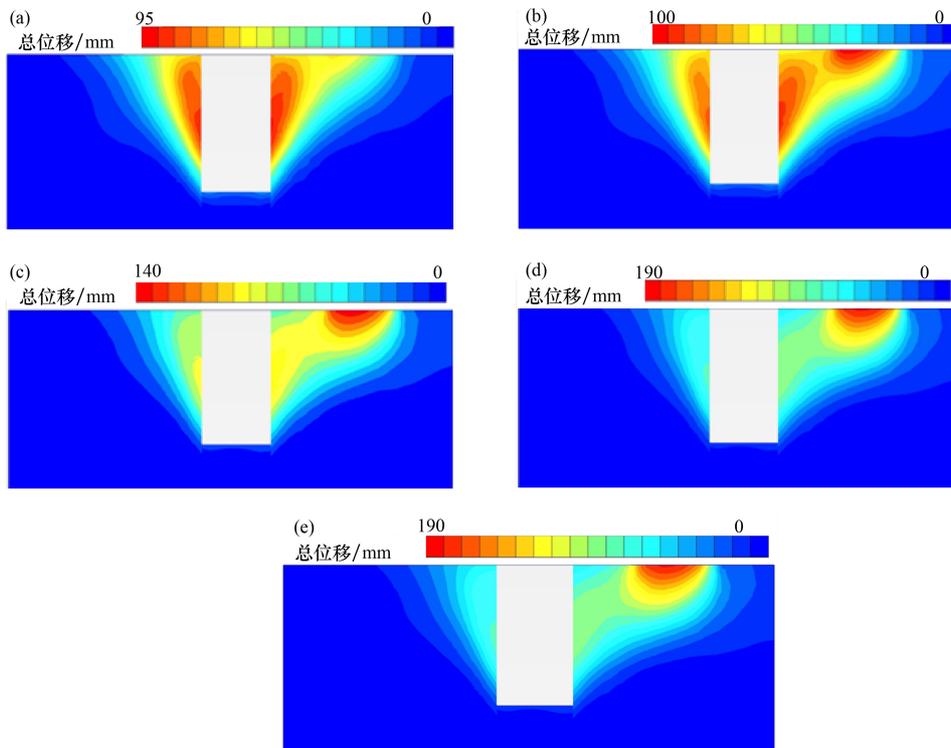
荷载/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$): (a) 0; (b) 20; (c) 40; (d) 60; (e) 80

图 6 不同荷载下竖直方向上的位移云图

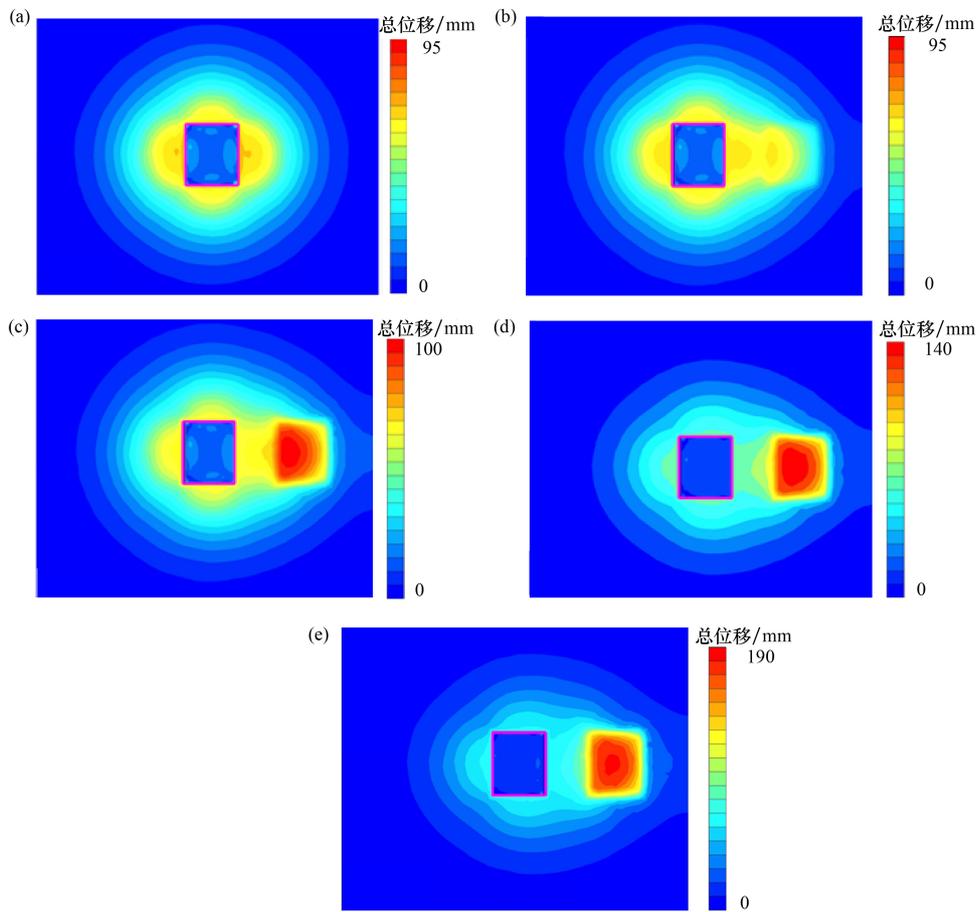
图 7 为不同荷载下地表位移云图。由图 7 可知: 荷载对竖井底部影响很小, 只有靠近荷载的基坑侧才会受到影响, 荷载对地表的影响也很集中, 主要在荷载面。随着荷载的增加, 其对地表的影响范围变大, 当荷载为 $20、40 \text{ kN/m}^2$ 时, 其对地表的影响较小, 位移范围为 $30 \sim 60 \text{ mm}$; 当荷载达到 60 kN/m^2 时, 其对竖井 3 倍宽度范围内都有影响, 地表位移范围为 $100 \sim 110 \text{ mm}$; 当荷载达到 80 kN/m^2 时, 最大荷载位置出现在荷载面, 位移范围为 $130 \sim 140 \text{ mm}$ 。

3.3 荷载与竖井边距离的影响

为研究地表荷载距离对竖井开挖的影响, 设计荷载与竖井边距离为 $2、4、6 \text{ m}$ 的开挖工况,

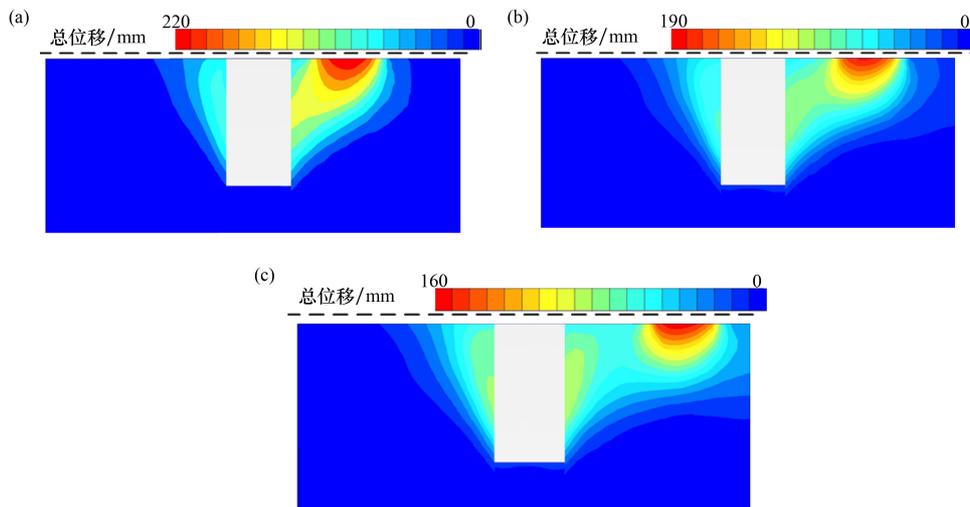
荷载面积为 $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 并以大荷载 80 kN/m^2 为讨论背景。图 8 为竖直方向上的总位移云图。由图 8 可知: 随着荷载距离的增加, 最大位移减小, 说明远离基坑施工, 土体的形变量会减小, 对基坑的影响变小, 同时基坑总体变形量也减小, 排桩所受的应力显著减小, 基坑的稳定性增加。值得注意的是, 当荷载距离为 6 m 时, 排桩两侧的位移变化相似, 说明距离达到 6 m 时, 荷载位置对排桩附近的影响很小。

图 9 为不同荷载距离下地表的位移云图。由图 9 可知: 当荷载距离小时, 地表位移表现出明显的集中性, 影响范围小, 土体变化大; 当荷载距离大时, 地表位移有明显的分散性, 影响范围



荷载/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$): (a) 0; (b) 20; (c) 40; (d) 60; (e) 80

图 7 不同载荷下地表位移云图



距离/m: (a) 2; (b) 4; (c) 6

图 8 不同距离下竖井垂直方向上的总位移云图

大, 土体变化较小。地表最大位移随着载荷距离的减小而减小, 从最大位移的减小量来说, 载荷距离从 2 m 增加至 4 m 时, 最大总位移的变化量

为 30 mm, 载荷距离从 4 m 增加至 6 m 时, 最大总位移的变化量也为 30 mm, 最大总位移与载荷距离表现出较好的正向相关关系。

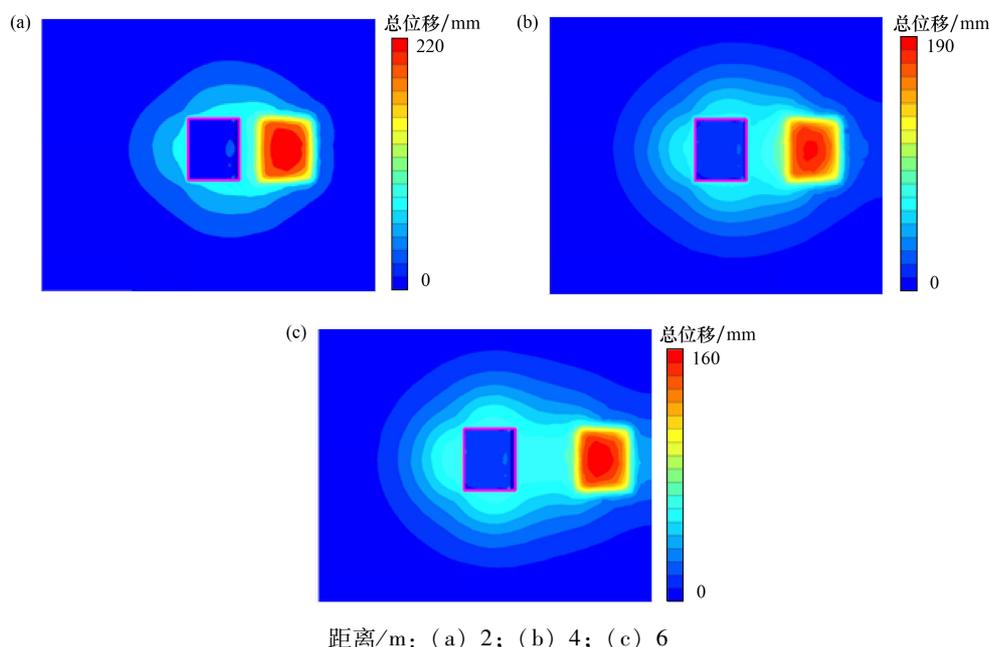


图 9 不同距离下地表位移云图

4 结 论

本文以长沙地铁某车站出入口的竖井为工程背景,探讨了竖井的开挖对土体沉降的影响以及载荷大小对竖井的影响,主要结论如下。

(1) 在软土为主要土质的无内支撑竖井开挖过程中,土体的形变面积逐渐减小,最大的形变发生在地表土层上。

(2) 在垂直方向上,随着深度的增加,土体的位移量呈现先增加后减小的趋势。黏土土质的位移量最大,约为 60 mm。

(3) 载荷的增加对竖井底部的影响非常有限。当载荷达到 60 kN/m^2 时,影响范围覆盖了竖井宽度的 3 倍范围,地表位移范围为 $100 \sim 110 \text{ mm}$;当载荷达到 80 kN/m^2 时,最大的影响区域位于载荷面,地表位移可达 $130 \sim 140 \text{ mm}$ 。

(4) 最大总位移与载荷距离表现出了较好的正向相关关系,最大位移量随载荷距离的增加而减小,当载荷距离为 6 m 时,载荷位置对排桩附近的影响很小。

参考文献:

[1] 林志斌,张勃阳,杨大方.考虑蠕变与渗流作用的软土基坑开挖模拟研究[J].现代隧道技术,2020,

57(1):91-98.

- [2] 王燕,谢秀栋,张飞.道路拓宽改造对邻近建筑地基变形影响分析与控制[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(2):179-185.
- [3] 农宇.近邻既有建筑软土地层深基坑开挖变形规律及优化分析[D].南宁:广西大学,2022.
- [4] 朱剑钦.软土地区基坑开挖超静孔隙水压力分布的有限元分析[J].福建建设科技,2023(5):34-36.
- [5] 郭玉君,王雷,朱鹏.软土区基坑开挖对临近既有结构的影响[J].低温建筑技术,2023,45(8):150-154.
- [6] 曾森华,王飞祥,吴晨龙.中软土地区基坑开挖对邻近建筑物影响的模拟分析[J].安徽建筑,2023,30(9):140-142.
- [7] 蔡映坤,李波,和子祺,等.河湖相软土区某深基坑开挖变形特征分析[J].地质灾害与环境保护,2023,34(2):72-77.
- [8] 吴安康.基坑开挖中软土地基支护与桩基施工探究[J].城市建筑空间,2022,29(增刊2):892-893.
- [9] 李连祥,张永磊,扈学波.基于 PLAXWIS 3D 有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(增刊1):254-261;266.
- [10] 王翠.天津地区地铁深基坑变形及地表沉降研究[D].天津:天津大学,2005.
- [11] 周贺.土岩组合地区深基坑开挖地表沉降变形研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.