

文章编号: 1674-599X(2020)03-0050-06

# 超期服役基坑变形关键影响因素模拟分析

门彬

(中铁城建集团有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘 要:** 针对施工过程中, 基坑工程因各种原因长期停工而处于超期服役的问题。以湖南文化广场二期深基坑工程为例, 利用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟, 得到影响超期服役基坑变形规律的关键因素。研究结果表明: 地面荷载对基坑开挖全阶段均有影响, 嵌固深度对基坑复工后开挖阶段影响较为明显, 开挖深度仅影响停工前开挖阶段。支护桩桩顶水平位移趋于平稳时, 停工时长对基坑开挖各阶段的影响不大。基于研究结果, 提出了超期服役基坑安全的优化方法。

**关键词:** 基坑; 超期服役; 数值模拟; 变形规律

**中图分类号:** TV551.4<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.008

## Simulation analysis of key factors affecting the deformation of overdue foundation pit

MEN Bin

(China Railway Urban Construction Group Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** During the construction process, many foundation pit projects are in the state of shutdown due to various reasons. In order to study the key factors affecting the deformation law of the overdue foundation pit. A series of numerical simulations are conducted by using ABAQUS software taking the 2nd phase of the deep foundation pit in Hunan cultural square as an example. Simulation results indicate that the ground load has influence on the deformation during the whole stage of foundation pit excavation. The influence of the embedment depth on the deformation is obvious during the excavation stage after the foundation pit is resumed. The excavation depth only affects the deformation during the excavation stage before the shutdown. The duration of shutdown has little effect on the deformation. Based on the research results, the optimization method for safe excavation of the overdue foundation pit is proposed.

**Key words:** foundation pit; overtime service; numerical simulation; deformation law

在土建工程中, 基坑工程规模不断扩大, 施工环境日趋复杂。基坑因长期停工对邻近建筑物产生不良影响, 易造成地表沉降与变形。目前, 国内外关于基坑超期服役的风险研究取得了一些成果。Ding<sup>[1]</sup>等人基于城市建设的发展, 通过三维有限元分析, 为基坑的优化设计与施工提供了参考。Zhou<sup>[2]</sup>等人依托上海地铁 10 号线, 通过数值模拟, 分析了基坑的地表沉降。杨春山<sup>[3]</sup>等人根据深基坑工程

的实际情况, 考虑了开挖过程与外部人工变形扰动的影响。通过数值模拟, 分析了基坑中的应力与位移规律。Ma<sup>[4-5]</sup>等人结合实际项目, 通过神经网络, 进行基坑变形的预测, 具有良好的应用前景。陈尚荣<sup>[6]</sup>等人通过数值模拟, 分析了不同支护形式下深基坑开挖对邻近矩形地下通道变形的影响。黄 戡<sup>[7]</sup>等人通过有限元方法, 建立了三维数值模型, 分析了基坑降水速度对邻近地铁区间隧道影响的敏

收稿日期: 2019-12-04

作者简介: 门彬(1985-), 男, 中铁城建集团有限公司工程师。

感性，并与实际监测结果进行对比分析。应用数值模拟计算，分析与预测基坑结构的变形已日趋成熟。本研究采用有限元法，拟考虑时间效应的影响和锚索预应力损失的时变性，结合《基坑工程手册》<sup>[8]</sup>与基坑变形分析<sup>[9-13]</sup>，依托湖南文化广场二期的深基坑工程，对桩锚式支护结构的基坑发生变形的关键因素进行分析，以期为类似工程变形研究提供借鉴。

1 工程概况

1.1 工程概况

拟建的湖南文化广场二期基坑工程开挖深度为 17~26 m，施工安全等级为一级，如图 1 所示。



图 1 项目停工后基坑状况

Fig. 1 Foundation pit condition after project shutdown

由于该基坑支护工程中后期停工 18 个月后，重新复工，已超过其设计使用年限，属于超期服役基坑。通过数值建模分析，得到该超期服役基坑的关键影响因素，为安全施工提供参考与指导。

1.2 控制指标与影响因素的确定

基坑支护结构对基坑和周边环境的安全及顺利施工起重要作用，其结构的应力与变形是基坑工程研究的重要参考指标。在结构材料强度确定的情况下，结构的应力大，小以变形的形式表现。同时，

基于结构力学位移法，结构的变形也能反映了结构的受力。所以以支护桩的变形为研究对象，支护桩的水平位移中桩顶位移始终为最大值，且支护桩的竖向位移在基坑的停工阶段无明显变化。因此，选取支护桩的桩顶水平位移作为超期服役基坑研究的控制指标。

考虑超期基坑的实际工程因素和模拟方案设计的可行性，对基坑外侧地面荷载  $q$ 、支护桩在基坑底部的嵌固深度  $b$ 、在停工前的开挖深度  $h$  及停工时长  $t$  作为研究的主要影响因素。

2 数值模拟分析

2.1 计算模型的建立

对湖南文化广场二期基坑东侧基坑开挖剖面建立二维模型，其剖面形状呈长方形，尺寸为  $50\text{ m}\times 100\text{ m}$ ，基坑设计开挖深度为  $18\text{ m}$ 。采用桩径为  $1.2\text{ m}$ ，净距为  $1\text{ m}$  的支护桩，作为挡土结构和桩间摆喷止水帷幕。其土层分为 3 层：第一层土为粉质黏土层；第二层土为强风化土层；底层土为中风化土层。基坑外土体地面荷载为  $20\text{ kPa}$ ，支护桩高度为  $23\text{ m}$ 。该基坑在开挖  $11\text{ m}$  和前 3 排锚索施工完成后，停工了 18 个月，复工后，继续开挖  $7\text{ m}$ ，并完成后 2 排锚索的施工。对该基坑采用具有流变特性的本构模型<sup>[11-13]</sup>，并基于基坑变形，考虑锚索的预应力损失，利用 ABAQUS 软件，进行有限元数值模拟。基于 Drucker-Prager 模型的时间硬化幂函数蠕变法，对这 3 层土体的黏弹塑性进行模拟，土层物理力学参数见表 1。

锚索所采用的钢绞线材料为单向受拉材料，其弹性模量为  $210\text{ GPa}$ ，泊松比取  $0.3$ 。为便于使用降温法，施加预应力，设定锚索材料的膨胀系数为  $9.84\times 10^{-5}$ ，初始温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在模拟预应力的分析步中，温度值改为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在预应力损失的分析步

表 1 土层物理力学性质参数表

Table 1 Soil layer physical and mechanical properties

土层名称	重度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	$A$	$n$	$m$
粉质黏土	20.4	7.5	35	18	$2.4\times 10^{-10}$	0.8	-0.99
强风化土	21.6	42.0	60	25	$2.4\times 10^{-11}$	0.8	-0.99
中风化土	21.6	170.0	150	30	$2.8\times 10^{-12}$	0.8	-0.99

注： $A,n,m$  为 ABAQUS 进行黏弹塑性建模过程中的必要参数。

中，温度值改为 8℃。

基坑的土方开挖施工，因历时较短，不考虑土体蠕变效应。因为开挖结束后，该基坑停工 18 个月，导致放置时间较长，所以须重点监测土体的蠕变效应。由于在停工期间，基坑内、外土体所承受荷载，可视为不变。因此，本次计算采用 TIME 硬化法则进行模拟分析。基坑整体模型、支护桩及锚索结构的模型如图 2 所示。

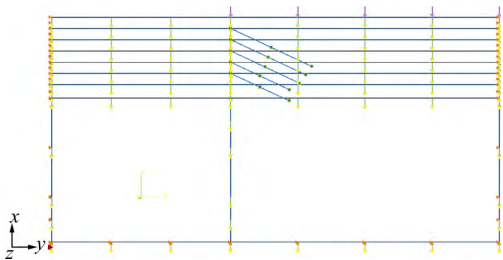


图 2 模型有限元网格

Fig. 2 Model finite element mesh

表 2 基坑模拟计算步

Table 2 Calculation step of foundation pit simulation

模拟步	内容	目的	历时/d
1	重力分析	初始地应力平衡	0
2	支护桩施工	支护桩浇筑施工	7
3	第一次开挖步	开挖至地表以下-2.5 m	7
4	第二次开挖步	开挖至地表以下-5 m，第一排锚索施工	10
5	第三次开挖步	开挖至地表以下-7.5 m，第二排锚索施工，第一排锚索预应力损失	10
6	第四次开挖步	开挖至地表以下-10 m，第三排锚索施工，第二排锚索预应力损失	10
7	停工 18 个月	荷载不变，考虑土体蠕变效应，第三排锚索的预应力损失	540
8	第五次开挖步	开挖至地表以下-12.5 m，第四排锚索施工	10
9	第六次开挖步	开挖至地表以下-15 m，第五排锚索施工，第四排锚索预应力损失	10
10	第七次开挖步	开挖至地表以下-18 m，第五排锚索预应力损失	10

根据该基坑工程的全部施工过程，建立分析步，每一分析步完成相应的施工任务，见表 2。

2.2 模拟方案的设计

将  $q$ 、 $b$ 、 $h$  和  $t$  4 个影响因素的某一个因素作为变量，其余因素不变，进行模拟方案的设计，将基坑在不同工况下的开工、停工、复工及开挖完成的全过程中，支护桩桩顶水平位移随时间变化的数据进行对比分析。

- 1) 以  $q$  作为变量进行模拟分析，分别取 10,15, 20,25,30 kPa 5 种工况进行计算。
- 2) 以  $b$  作为变量进行模拟分析，分别取 5,6, 7,8,9 m 5 种工况，进行计算。
- 3) 以  $h$  作为变量进行模拟分析，分别取为 5,7.5, 10,12.5,15 m 5 种工况，进行计算。
- 4) 以  $t$  作为变量的对比模拟，分别取 18,24,30, 36,42 个月 5 种情况，进行计算。

3 数值模拟结果分析

3.1 地面荷载对支护桩桩顶水平位移的影响分析

在不同地面荷载作用下，支护桩桩顶的水平位

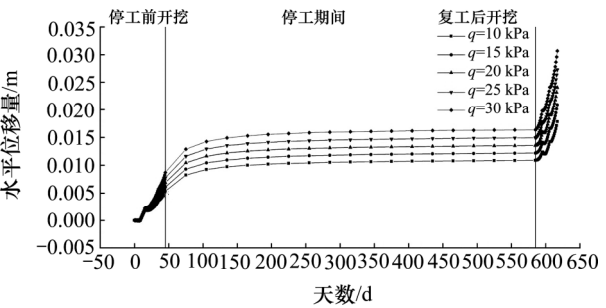


图 3 不同外侧地面荷载支护桩桩顶水平位移随时间变化

Fig. 3 Influence of different ground load on horizontal displacement of support pile at the top

移随时间变化的过程如图 3 所示。从图 3 可以看出，基坑外侧地面荷载的增大，基坑在停工前开挖阶段、停工期间和复工开挖阶段，支护桩桩顶的水平位移随着时间的变化，速率不断增大。其中，停工前开挖阶段，桩顶水平位移的增长速率最为明显。而基坑停工和复工后的开挖阶段，桩顶水平位移呈线性增长。基坑施工完成时，桩顶水平位移呈近似线性增长。表明：基坑随着外侧地面荷载的增大，桩顶水平位移的变化速率和最终位移大小，均呈线性增长。

### 3.2 嵌固深度对支护桩桩顶水平位移的影响

不同支护桩的嵌固深度下, 支护桩桩顶的水平位移随时间变化的过程, 如图4所示。

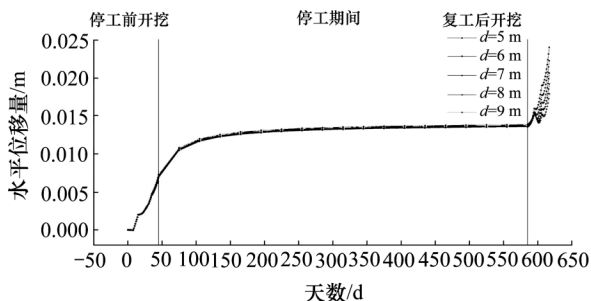


图4 不同嵌固深度支护桩桩顶水平位移随时间变化

Fig. 4 Influence of different embedded depth on horizontal displacement of support pile at the top

从图4可以看出, 随着支护桩嵌固深度的增大, 基坑在停工前的开挖阶段、停工期间及复工开挖阶段, 桩顶水平位移随着时间的变化, 速率不断减小。其中, 在基坑的停工前开挖阶段和停工期间, 桩顶水平位移呈线性增长, 但降低幅度极小, 可忽略不计。而在停工后开挖阶段的桩顶的水平位移, 递减速率较明显。在基坑施工完成时的桩顶水平位移量呈近似线性递减。表明: 支护桩嵌固深度对基坑停工前的开挖阶段和停工期间桩顶水平位移的影响较小。而对基坑复工后的开挖阶段影响较明显, 在该阶段中, 桩顶水平位移随着支护桩嵌固深度的增大, 变化速率和位移大小均呈线性递减。

### 3.3 开挖深度对支护桩桩顶水平位移的影响

基坑停工在不同开挖深度情况下, 支护桩桩顶的水平位移随时间变化的过程如图5所示。

从图5可以看出, 停工前, 开挖深度的增大, 基坑支护桩桩顶水平位移不断增大。而在基坑的停

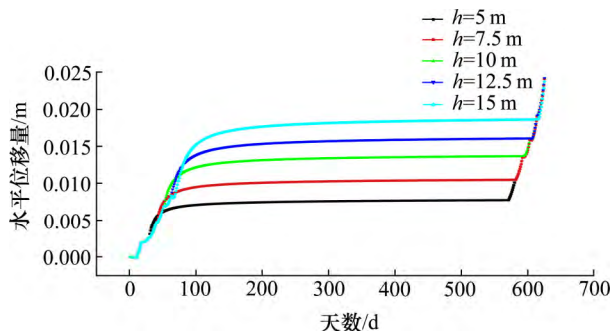


图5 不同开挖深度桩顶水平位移随时间变化

Fig. 5 Influence of different excavation depth on horizontal displacement of support pile at the top

工期间, 停工在不同开挖深度情况下, 支护桩桩顶水平位移的增长速率, 具有相似性, 即增长速率前期快, 后期逐渐减小。到复工后的开挖阶段, 停工在不同开挖深度情况下, 桩顶水平位移的增长速率和水平位移均相同。表明: 超期服役基坑停工期间和复工后, 开挖完成的深度, 不影响开挖深度桩顶水平位移的大小。停工时不同的基坑只会影响停工前开挖阶段所导致的桩顶水平位移的大小。

### 3.4 停工时长对支护桩桩顶水平位移的影响分析

基坑在不同停工时长下, 支护桩桩顶的水平位移随时间的变化过程如图6所示。

从图6可以看出, 基坑随着停工时长的增加, 在停工前和复工后的开挖阶段, 桩顶水平位移随着时间的变化, 速率相似。因为基坑停工时长的增加, 基坑在停工期间, 前期的桩顶水平位移增长速率不断增长, 而后期的增长较小, 逐渐趋于稳定。所以对基坑在复工后开挖最终完成时的桩顶水平位移值影响不大。表明: 基坑停工期间, 由于桩顶位移速率前期大, 后期逐渐减小。因此, 当基坑停工时长达到桩顶水平位移变化趋于平稳时, 若无其他外荷载的变化, 其时长的增加对桩顶水平位移值影响不大。

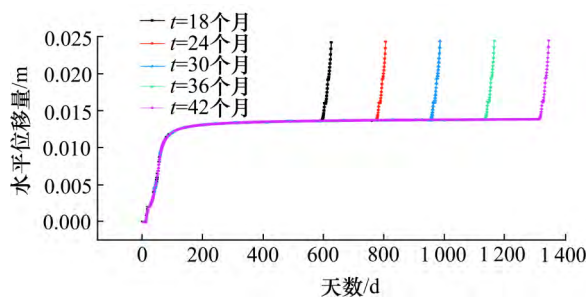


图6 不同停工时长支护桩桩顶水平位移随时间变化

Fig. 6 Influence of different stopping time length on horizontal displacement of support pile at the top

### 3.5 数值模拟与实测数据对比分析

为验证数值模拟计算结果的正确性, 对于原数值模拟, 考虑其支护桩桩顶在停工期间的水平位移变化和基坑外侧距支护桩10m处土体的沉降值, 并将其与实测数据进行对比。

在停工期间, 支护桩桩顶水平位移随时间变化的数值模拟与实测数据对比, 如图7所示。从图7可以看出, 虽然实测数据因测量精度和误差等问题, 导致其具有明显的离散性。但是, 实测数据与



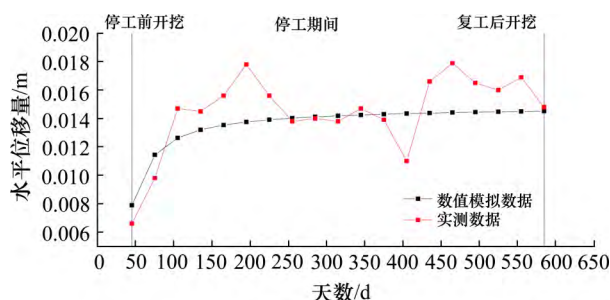


图7 支护桩桩顶水平位移随时间变化对比

Fig. 7 Comparison of horizontal displacement of support pile at the top with time

数值模拟计算结果,具有良好的拟合效果。

从图7可以看出,不论是数值模拟结果,还是实测数据,桩顶水平位移值在停工期间,增长率达到5%,而桩顶水平位移在该停工期间,前期的增长速率较大,而后期的逐渐减小,趋于平稳缓慢。

在停工期间,基坑外侧10 m处的竖向位移随时间变化的数值模拟和实测数据对比,如图8所示。从图8可以看出,实测数据由于测量精度和误差等问题,因此,导致其具有明显的离散性。虽然数值计算结果与实测数据没有良好的吻合。但是二者的变化趋势具有相似性。

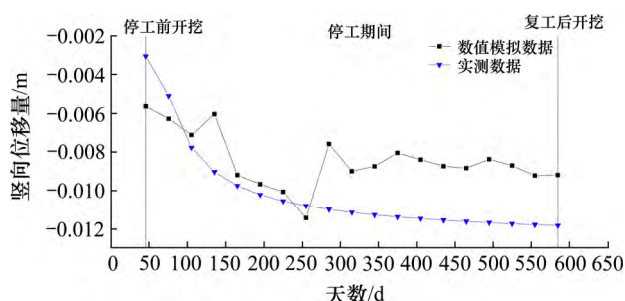


图8 基坑外侧10 m处的竖向位移随时间变化对比

Fig. 8 Comparison of vertical displacement with time at 10 m outside the foundation pit

从图8可以看出,不论是数值模拟值,还是实测数据,基坑外侧土体的沉降值显著增长。其中,实测数据的增长率达到了63%,而基坑外侧土体的沉降值,在该停工期间,前期的增长速率较大,而后期的逐渐减小,趋于平稳缓慢增长状态。

从数值模拟值与实测数据对比可知,虽然两者在部分数据上存在一定的误差,但总体的变化趋势相近,验证了本数值模拟的正确性。

## 4 结论

通过数值模拟计算,分析了超期基坑工程时间

效应的各种表现形式及产生的原因,时间效应的表现形式是变形随着时间变化而变化。得到的结论为:

1) 超期服役基坑的桩顶水平位移,随着基坑外侧地面荷载的增大,其变化速率和最终位移大小呈线性增大。

2) 在基坑停工前的开挖阶段和停工期间,支护桩嵌固深度对桩顶水平位移的影响较小,而对于基坑复工后的开挖阶段影响比较明显。在该阶段中,支护桩随着嵌固深度的增大,桩顶水平位移变化速率和最终位移大小,均呈线性减小。

3) 超期服役基坑停工前,开挖深度对停工期间及复工后的桩顶水平位移变化规律影响较小,但会影响停工前的开挖阶段所导致的桩顶水平位移的大小。

4) 基坑停工期间,桩顶水平位移的变化规律:前期增长速率大,后期的逐渐减小。则当基坑停工时长达到桩顶水平位移趋于平稳时,其停工期间时长的增大对桩顶的水平位移值影响不大。

## 参考文献(References):

- [1] Ding J S,Xian Y Q,Liu T J.Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. Advanced Materials Research,2011,368-373:2562-2566.
- [2] Zhou N,Vermeer P A,Lou R,et al.Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J].Engineering Geology, 2010,114(3-4):251-260.
- [3] 杨春山,何娜,张雅宁.考虑渗流-应力耦合基坑开挖降水粉值分析[J].广东工业学报,2013,30(4):43-48.YANG Chun-shan,HE Na,ZHANG Ya-ning.Numerical analysis of seepage-stress coupling of deep foundation pit excavation[J].Journal of Guangdong University of Technology,2013,30(40):43-48.
- [4] Ma F H,Zheng Y,Yang F.Research on deformation prediction method of soft soil deep foundation pit[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China),2008, 14(4):637-639.
- [5] Ming H,Jun L,Ning W.Foundation pit multi-point displacement RBF monitoring model and application key points[C]// International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering. IEEE, 2010.
- [6] 陈尚荣,曹传祥,廖志坚.不同支护深基坑开挖对地下通

- 道变形的影响[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4): 43-52. (CHEN Shang-rong, CAO Chuan-xiang, LIAO Zhi-jian. The influence of deep excavation on the deformation of surrounding rectangular underground tunnel based on different supporting forms[J]. Journal of Traffic Science and Engineering, 2018, 34(4): 43-52. (in Chinese))
- [7] 黄戡, 马启昂, 詹艳云. 深基坑开挖降水对邻近地铁隧道的影响[J]. 公路工程, 2018, 43(2): 145-150. (HUANG Kan, MA Qi-ang, ZHAN Yan-yun. The Influence of deep foundation excavation pit and dewatering on adjacent metro tunnel[J]. Highway Engineering, 2018, 43(2): 145-150. (in Chinese)).
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Handbook of Foundation Pit Engineering (Second Edition)[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 张钦喜, 吴浩, 晁哲. 超期服役基坑的监测及数值分析[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(4): 186-191. (ZHANG Qin-xi, WU Hao, CHAO Zhe. Measurement and numerical simulation of extended service foundation[J]. Geotechnical Engineering Technology, 2017, 31(4): 186-191. (in Chinese))
- [10] 罗玉博. 桩锚支护结构深基坑变形计算分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017. (LUO Yu-bo. Study on the calculation and analysis of deformation in deep foundation pit with pile anchor supporting structure[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [11] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Wei. Rheological material and its engineering application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [12] 赵雁, 姬海君, 安晓宁, 等. 用 ABAQUS 对光滑试件的蠕变与应力松弛进行的数值模拟[J]. 武警工程学院学报, 2001(17): 6-7. (ZHAO Yan, JI Hai-jun, AN Xiao-ning, et al. Numerical simulation of creep and stress relaxation of smooth specimens by ABAQUS[J]. Journal of the Chinese People's Armed Police Force College, 2001(17): 6-7. (in Chinese))
- [13] 张兆龙. 超期服役深基坑的变形特性分析及稳定性评估[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 74-78, 90. (ZHANG Zhao-long. Deformation characteristics analysis and stability assessment of extended service deep foundation pit[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(2): 74-78, 90. (in Chinese))