Vol. 29 No. 6 Dec., 2018

DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2018. 06. 31

# 沿海某机场扩建工程基坑监测分析

代仲海1, 赵俊伟2

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 内蒙古呼伦贝尔市公路质量监督站, 内蒙古 呼伦贝尔 021008)

摘 要:基于机场禁飞区改建工程基坑围护结构及周围土体变形监测结果,结合软土基坑的变形规律,对复杂施工环境和施工时间限制条件下的围护墙体变形、坑后土体竖向位移、支撑轴力以及立柱桩隆沉等变化规律的时间和空间效应做了总结。研究表明:围护结构测斜沿深度呈现出先增大后减小的趋势,水位平移最大值位置出现在开挖面附近,且围护结构水平位移具有明显的时空效应;地表沉降出现沉降槽,深层土体开挖引起地表沉降为总沉降的主要部分,底板浇筑有效地抑制了墙后地表沉降;支撑轴力随施工进度而增加,第2道支撑的施加可减少第1道支撑轴力;立柱桩位移为上浮,其大小随着基坑开挖而增大并趋于稳定。研究结果对机场禁飞区改建工程基坑开挖具有一定参考价值。

关键词: 机场禁飞区; 基坑工程; 变形; 沉降; 机场扩建工程

中图分类号: TU470<sup>+</sup>.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)06-0201-06

## Foundation pit monitoring of an coastal airport expansion project

### DAI Zhonghai<sup>1</sup>, ZHAO Junwei<sup>2</sup>

- (1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
- 2. Quality Supervision Station of Highway of Hulun Buir City in Inner Mongolia, Hulun Buir 021008, China)

Abstract: Based on mounts of monitoring data from airport no fly zone expansion project foundation pit, the supporting structure deformation, ground settlement, axial force and pile displacement under complex construction environment and limited construction time were comprehensive analyzed. The results showed that: the horizontal displacement of retaining wall was slight at upper and lower ends, but broad in the middle, increases with the excavation and has a space-time effect. The surface settlement has settlement trough, the subsidence cause by excavation of deep soil is the main part of the total settlement, and the pouring of bottom plate inhibit the surface subsidence effectively. The axial force increases with the construction, and the construction of the second support reduces the axial force of the first support. The displacement of the soldier piles is upward, increases with the excavation and tends to be stable. This study can be a reference for the excavation of foundation pit at airport no fly zone.

Key words: airport no fly zone; foundation pit; deformation; settlement; airport expansion project

# 1 研究背景

随着各地航空枢纽的建设,机场的航空业务量 持续增长,航空公司机队规模也不断增加,这无疑增 加了机场的运行压力,从而促使机场对其硬件设施 进行改造升级。对机场进行扩建成为解决运行压力 的首要办法。沿海某国际机场地下运输通道建设及 机坪扩建项目即是出于缓解日益增加的运营压力而 进行的扩建工程,其中飞行区下穿通道工程涉及基坑开挖施工。基坑开挖是一项相对复杂的工程,一方面要关注基坑的稳定性,即在基坑设计时要满足强度要求;另一方面,由于基坑开挖导致的土体卸荷会引起围护结构自身变形及周围土体的变形,进而会对周围环境造成影响。开挖对周边建(构)筑物影响大的基坑工程,基坑设计将从满足稳定性条件向满足变形条件转变,这也意味着基坑工程的安全

收稿日期:2018-04-19; 修回日期:2018-09-15

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2017JM5059)

**作者简介:**代仲海(1984-),男,湖北潜江人,博士研究生,高级工程师,主要从事地基与基础工程、地下洞室稳定性分析等方面的研究工作。

性转变为变形控制[1-2]。

本文涉及的机场飞行区下穿通道工程横穿 T3 (运营)、T4(运营)及 T0(新建)飞机滑行跑道。根据机场运行要求,在基坑施工过程中,3 条滑行跑道中的两条必须正常使用。且部分区域需要在夜间停航期间施工(工人及机器进场至撤场时间仅为6.5 h),施工效率低。这将使开挖面长时间暴露,围护结构位移及周边地表沉降有较长时间发展,影响基坑安全及滑行道的正常运营。另外基坑开挖影响范围内涉及数条管线,探查资料表明,主要包括机场正常运营必须的输油和输电管线以及市政管线等,这些管线对周围地层的变形非常敏感,关系到机场运营的安全。因此基坑工程施工(包括围护结构、地层开挖等)时,严格控制对周边地层的变形的影响,并采取相关措施进行有效保护,是关系工程成败的关键一环。

工程人员和学者对基坑开挖的时间效应[3-5]、 施工引起的土体位移[6-8]、管线变形[9-11]开展了大 量的实测和试验研究。在时间效应方面,王国粹 等[12]考虑软土的流变效应,采用数值模拟的方法对 上海某基坑工程逆作法施工进行了研究,研究结果 表明,加快土体开挖速度能有效减小围护桩变形。 王志鹏等[13]基于流固耦合的基本控制方程,编制了 相应的可以考虑时间效应的程序,分析了开挖速率 对软黏土深基坑时间效应的影响。林志斌等[14]采 用有限差分软件分析了由于基坑开挖导致的围护结 构及周围地层的变形规律,在模型中考虑了土体的 流变特性和支撑结构混凝土强度随时间的变化。在 对周边管线影响方面,谢雄耀等[15]运用现场监测和 有限元模拟的方法对基坑开挖引起下卧层既有电力 隧道变形的控制技术进行了研究。李镜培等[16]通 过对基坑项目实测数据的整理,分析了上海地区基 坑的空间效应和深度效应,主要讨论了挡墙侧移、支 撑轴力、立柱隆沉等随土体开挖卸荷的变化规律。 姜峥[17]以弹性地基梁理论为基础,得到了管线变形 和内力的理论解答,同时为简化理论解答计算,进一 步给出了加权残值解。

本文在总结围护结构和周围地层变形规律研究成果的基础上,基于机场地下运输通道及机坪改造工程实测结果,总结了受开挖时间和周边复杂环境影响的基坑开挖时围护墙体变形及基坑周围地层变形的规律。针对施工时间限制和管线变形控制要求,对施工方案进行优化,可以为开挖时间受限的基坑工程施工积累经验。

# 2 工程概况及地质条件

### 2.1 工程概况和周边环境

本工程包括 T1 航站楼 - S1 卫星厅和 T2 航站楼 - S2 卫星厅两个下穿通道,使用功能为连接航站楼和卫星厅的机场服务车地道、旅客捷运通道和行李车地道。T1 - S1 下穿通道为新建地道,包括行李车地道和东、西服务车地道;T2 - S2 下穿通道北接已建地道,南端预留接口与规划的捷运区间连接,包括行李车地道、捷运地道和东、西服务车地道。

本工程中T1-S1下穿通道基坑除东服务车地道北匝道外,其余部分基坑并坑实施。基坑开挖深度最大为10.6 m,宽度为10~36 m,局部泵房处基坑开挖深度为11.8~13.6 m。T2-S2下穿通道基坑除东、西服务车地道北匝道以及东服务车地道南匝道外,其余部分基坑并坑实施。基坑开挖深度最大约为10.5 m,宽度为10~52 m,局部泵房处基坑开挖深度为11.5~12.8 m。基坑平面布置如图1所示。

工程建设场地范围内有航油、上水、污水、电力、信号等管线,根据管线改迁计划,受基坑开挖影响的管线有:T1-S1下穿通道FK0+875~FK0+950段基坑西侧有信号、电力、上水、雨水和污水管线。T2-S2下穿通道BK0+525~BK0+625段基坑两侧有信息、电力等管线。T2-S2下穿通道BK0+750~BK0+875段基坑两侧有电力和上水等管线。

#### 2.2 水文地质概况

根据勘察资料,拟建场地自地表以下 43.3 m 深度范围内可划分为 5 个土层。土层分布及土层性质如表 1。

表 1 土层物理力学性质参数

土层编号	土层	厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	杂填土	1.3	18.9	5. 0 × 10 <sup>-6</sup>	17	25.0
2	粘质粉土	7.3	18.4	$3.0 \times 10^{-6}$	5	30.5
3	淤泥质粘土	7.5	17.0	$3.0 \times 10^{-6}$	14	12.5
4	粘质粉土	10.8	18.2	$1.0 \times 10^{-5}$	17	19.5
(5)	粉质粘土	16.4	18.3	$6.0 \times 10^{-5}$	17	22.0

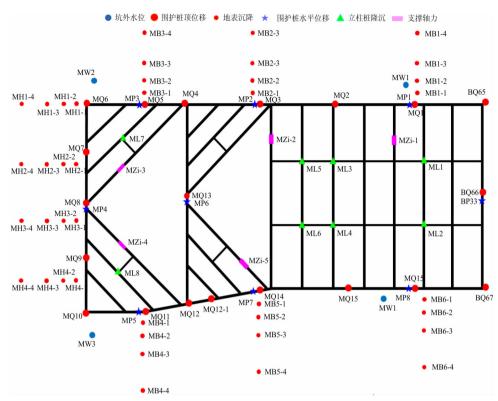


图 1 基坑平面图及测点布置

拟建场地潜水年平均水位埋深为 0.50 ~ 0.70 m,低水位埋深为 1.50 m。拟建场地内承压水分布于第⑦层。承压水水位均低于潜水位。

# 3 支护方案和基础加固措施

### 3.1 支护方案

本工程处于机场范围内,受周边环境条件限制较多,根据机场运行要求,施工期间T3、T4以及新建T0滑行道中应保证两个能够正常使用。因此将整个下穿通道工程沿纵向分段施工,主要分以下3个阶段:(1)实施新建T0滑行道范围内的地道结构及滑行道。T3、T4滑行道正常运营;(2)开通新建T0滑行道,T4滑行道正常运营,停用中间T3滑行道,实施中间滑行道范围内的地道结构,结构实施完毕后恢复T3滑行道;(3)新建T0滑行道及T3滑行道正常运营,停用T4滑行道,实施剩余范围内的地道结构,结构实施完毕后恢复T4滑行道。

对于禁飞区内需要夜间施工的部分,采用钻孔灌注桩作为维护结构。根据开挖深度和环境保护等级不同,采用  $\Phi$ 700 @ 850、 $\Phi$ 800 @ 950 和  $\Phi$ 900 @ 1050 等不同尺寸,钻孔灌注桩外侧采用双排止水帷幕,插入比约 1: 1. 2,在深度方向设置两道支撑,分别为 1 道混凝土支撑和 1 道钢支撑,坑底设高压旋

喷桩裙边固,典型基坑剖面图如图 2(a) 所示。

对于非禁飞区内的基坑,采用 Φ850SMW 工法桩围护,型钢插二跳一,型钢插入比约 1: 1.2,在深度方向设置两道支撑,分别为 1 道混凝土支撑和 1 道钢支撑(局部换撑),坑底进行三轴搅拌桩加固,典型基坑剖面图如图 2(b)所示。

### 3.2 地基加固

为提高坑底地基土的力学性能,减小围护结构的水平位移及基坑开挖对周边环境的影响,根据前述围护体系设计条件以及上海地区的基坑工程经验,围护结构选用支护桩+内支撑时,坑底采用3~4 m的高压旋喷桩或三轴搅拌桩裙边加固。为减小使用阶段结构变形缝两侧的不均匀沉降,在结构变形缝两侧各设置2 m宽的坑底加固。

#### 3.3 地下水位控制

对于本基坑潜水控制,为保证基坑在开挖过程中的安全,需要降低坑内水位至开挖面以下 1~2 m。基坑范围内需要疏干土体的层位包括②~⑤层。采用井点降水的形式。坑外水位位于地表以下 0.5~0.7 m 位置,受到降水等补给的影响,在±100 cm 范围内变化。对于承压水,抗承压水稳定性满足要求。考虑到承压水的水头随季节有所变化,且区域内地质变化较大,因此施工时应监测⑦层承压水

水头,并验算基坑的稳定性,以决定是否需进行降水,井点降水方案和止水帷幕如图3所示。

严控禁区内止水帷幕、工法桩和坑内加固的施工质量,确保隔断基坑内外地下水,同时严格控制降水速度,以满足下一层土方施工为标准。加强禁区周边滑行道面的变形监测,并在混凝土灌注桩北侧设置注浆孔。在开始降水后一旦出现异常沉降时,立即停止降水,采用回灌技术或压密注浆方式迅速控制沉降和变形。

# 4 监测方案

监测项目包括对周围建筑物管线变形监测和对围护结构变形和内力的监测,通过信息反馈法指导施工。本文主要分析第二阶段施工过程中基坑围护结构的变形,因此仅叙述第二阶段的监测方案。第二阶段监测方案和测点布置如图1所示。

本工程第二阶段监测内容为:

- (1)围护结构测斜:在第二阶段基坑周围布置 8 个点,监测基坑维护墙体的水平位移,测点编号 MP1~MP8,如图 1 所示。
- (2)墙后地表沉降监测:在第二阶段围护结构 后布置6组墙后地表沉降测点,每组4个,编号为 MBi-1~MBi-6,如图1所示。
- (3)支撑轴力:在两道支撑上各布置 5 处轴力监测点,编号为 MZi 1 ~ MZi 5。

# 5 监测规律总结

### 5.1 围护结构测斜

图 4 和 5 分别为 MP1 和 MP5 测点不同施工阶段墙体测斜的变化规律,其位移报警值为 40 mm。

图 4 和 5 表明,基坑围护结构测斜在整个基坑工程施工过程中的变化形态一致。首先,围护结构测斜随深度先增大后减小,整体呈现"大肚状"。这与文献报道的有支撑的围护结构变形特点相一致。其次,由于土体的不断开挖,整个深度范围内围护结构测斜随基坑开挖不断增加,且其最大值也不断增加。分析图 4 中开挖深度为 6 m 和开挖深度为 8 m 两条曲线以及图 5 中开挖深度为 7 m 和开挖深度为 8 m 两条曲线以及图 5 中开挖深度为 7 m 和开挖深度为 8 m 两条曲线可以发现,开挖深层土体引起的围护结构侧向变形要大于开挖浅层土体所引起的围护结构侧向变形。同时,图 4 和 5 均表明随着基坑的开挖,测斜最大值位置也在不断下移,并处于开挖面附近。最后,从图 4 和 5 中看出,在基坑开挖完成以后底板浇筑前,测斜均有较大发展,这表明了基坑变形的时

间效应,另外还可以看出底板浇筑有效地抑制了围护结构的变形。

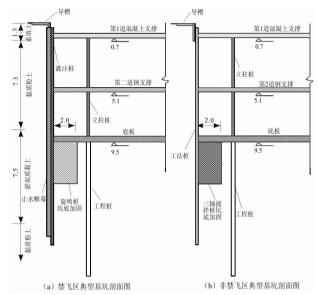


图 2 基坑剖面图(单位:m)

对比图 4 和 5 还可以看出, MP5 点测斜最大值 小于 MP1 点测斜最大值, 从图 1 中两测点位置可以 看出, MP1 点位于长边靠近中点的位置, 而 MP5 点 则处于基坑拐角处附近, 这表明基坑开挖导致围护 结构变形具有空间效应。

图 6 所示为基坑围护桩各测点侧向位移最大值的空间分布。由图 6 可以看出,测点 MP3 和测点 MP5 的侧移最大值明显小于其他测点,测点 MP4 侧移最大值较大。从图 1 中的测点布置可以看出,测点 MP3 和测点 MP5 位于基坑角点处,测点 MP4 位于基坑边中点处,这反映出了基坑开挖的空间效应,即基坑变形受到基坑大小和形状的影响。

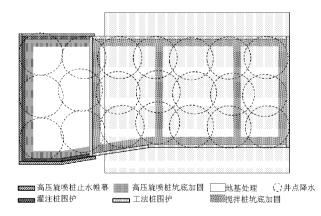
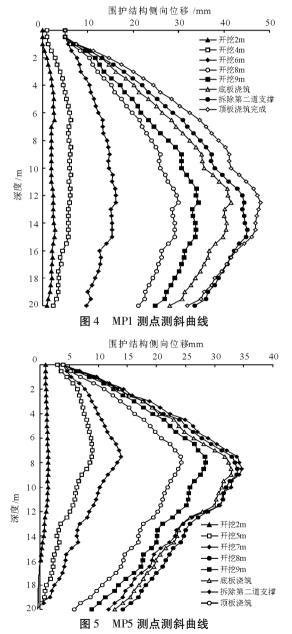


图 3 围护及加固平面图

#### 5.2 实测墙后地表沉降

图 7 所示为 MB4 观测点墙后地表沉降变化规律。从图 7 可以看出,不同的施工阶段,坑后地表沉

降变化规律具有一致性。在紧邻围护结构处,墙后 土体受到围护结构摩擦的影响,其沉降反而小于距 离围护结构一定距离处的地表沉降。对于距离基坑 较远处的地表沉降,由于受到开挖的影响较小,其值 也随距离的增加而减小。同时,对比不同施工阶段 沉降曲线的变化可以发现,与围护结构侧向变形规 律相似,开挖深层土体对墙后地表沉降影响较大,在 开挖4~9 m 至底板浇筑前的过程中,地表沉降最大 值从6.15 mm 增加到51.44 mm,增长了45.29 mm, 占地表沉降最大值的77.56%,由此可见开挖深层 土体对墙后地表沉降影响较大。



由图7还可以看出,随着基坑底板的浇筑完成,墙后土体的沉降基本维持不变,这主要是由于底板

的浇筑控制了坑内土体的隆起,进而阻止了坑外土 体向坑内变形。

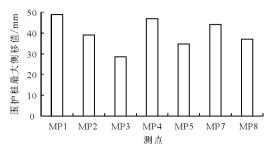


图 6 基坑围护桩各测点最大侧向位移

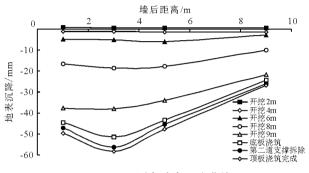


图 7 MB4 测点地表沉降曲线

### 5.3 支撑轴力

图 8 所示为基坑轴力变化曲线,其中 MZL1 - i 和 MZL2 - i 分别指第 1 道支撑和第 2 道支撑轴力。 其中 MZL1 - i 缺少第 5 天监测数据。

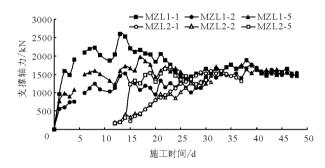


图 8 支撑轴力变化曲线

从图 8 中可以看出第一道支撑轴力有相同的变化趋势。随着土体开挖深度的不断增加,轴力逐渐增大,这主要是由于基坑内部卸荷,坑外土体主动土压力使得围护结构向内移动导致的。从图 8 中还可以看出在安装第 2 道支撑后,3 个测点的支撑轴力均有所回落,至开挖完成后达到稳定。在第 2 道支撑安装之后,其轴力也随开挖的加深而增加,最后在基坑开挖完成后达到稳定值。

#### 5.4 立柱桩竖向位移

随着基坑的开挖,立柱桩将会由于竖向荷载以及坑底土体回弹的双重作用下发生竖向位移,且当

不同立柱桩存在差异位移时将会在水平支撑中造成次生内力,因此对于立柱桩位移的监测也是基坑监测的重要部分。图 9 所示为立柱桩在基坑施工过程中的竖向位移曲线。

由图 9 可以看出,立柱桩竖向位移主要表现为上浮,即立柱桩产生向上的位移。随着土体的开挖卸荷,立柱桩竖向位移也逐渐增大,当基坑开挖完成后立柱桩位移基本稳定,略有下降,各立柱桩竖向位移最大值小于 35 mm。对比不同位置的立柱桩的竖向位移可以看出,各立柱桩位移变化规律基本一致,且各立柱桩在不同施工阶段位移差值均较小,最大差值为 4.81 mm,说明本工程的开挖方法和支护设计有效地控制了立柱桩的差异上浮,避免了由于立柱桩的差异位移引起的支撑次生内力。

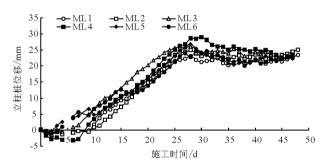


图 9 立柱桩竖向位移曲线

# 6 结 论

本文基于某机场改建基坑工程实测结果,结合 上海软土基坑的变化规律,对复杂施工环境和施工 时间限制下的基坑工程施工引起的本身和周围地层 的变形规律进行探讨,总结了以下规律:

- (1)围护结构测斜在深度方向上先变大后变小,最大值出现在开挖面附近,且随着开挖的加深而增加。围护结构测斜具有明显的时空效应,通过合理的施工组织,可有效控制夜间施工区围护结构的位移。
- (2)地表沉降出现了明显的沉降槽,地表沉降 主要由于深层土体卸荷所引起,底板浇筑对于控制 坑外土体变形具有显著的作用。
- (3)支撑轴力随施工进行而增加,且在施工完成后保持稳定。第1道支撑轴力在第2道支撑安装后有所回落。立柱桩位移表现为上浮,其竖向位移随着基坑开挖而增大,基坑开挖完成后基本稳定。

#### 参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 中国建筑工业出版 社,2009.
- [2] 王曙光. 复杂周边环境基坑工程变形控制技术[J],岩土工程学报,2013,35(S1);474-477.
- [3] 曹 净,丁文云,赵党书,等. 基于 LSSVM ARMA 模型的 基坑变形时间序列预测[J]. 岩土力学,2014,35(S2): 579-586.
- [4] 周冠南. 软弱地层深基坑开挖时空效应分析及控制[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(S1):1653-1658.
- [5] TAN Y, WEI B, ZHOU X, et al. Lessons learned from construction of Shanghai metro stations: importance of quick excavation, promptly propping, timely casting and segmented construction [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(4): 04014096.
- [6] 廖少明,魏仕锋,谭 勇,等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):458-469.
- [7] 沈路遥,钱建固,张戎泽. 挡墙水平变位诱发地表沉降的简化解析解[J]. 岩土力学, 2016,37(8):2293-2298.
- [8] 钱建固,周聪睿,顾剑波.基坑开挖诱发周围土体水平移动的解析解[J]. 岩土力学,2016,37(12):3380-3386.
- [9] 冯晓腊,熊宗海,莫云等. 复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):330-336.
- [10] 郑 刚,王 琦,邓 旭,等. 不同围护结构变形模式对坑外 既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015,37(7):1181-1194.
- [11] NG C W W, SUN H S, LEI G H, et al. Ability of three different soil constitutive models to predict a tunnel's response to basement excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015,52(11):1685-1698.
- [12] 王国粹,梁志荣,魏 详. 海中山医院基坑逆作法施工时间效应分析[J]. 岩土力学,2014,35(S2):495-500.
- [13] 王志鹏,冯怀平,张 良. 开挖速率对软黏土深基坑时间 效应的影响分析[J]. 施工技术,2016,45(7):62-65.
- [14] 林志斌,李元海,刘继强. 软土基坑变形时空演化规律研究[J]. 现代隧道技术,2016,53(3):82-90+97.
- [15] 谢雄耀,郁宏杰,王庆国,等.基坑开挖引起下卧既有电力隧道变形的控制技术研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(1);88-97.
- [16] 李镜培,陈浩华,李 林,等. 软土基坑开挖深度与空间效应实测研究[J]. 中国公路学报,2018,31(2):208 217.
- [17] 姜 峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(2):362-368.