

## 河湖相软土区某深基坑开挖变形特征分析

蔡映坤, 李波, 和子祺, 马云燕

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** 为研究在昆明市河湖相软土地区的复杂地质条件下, 基坑开挖施工过程中的变形特征, 以昆明市某地铁站深基坑的工程实例为背景, 结合基坑开挖施工过程中支护结构及周围土体变形监测数据, 运用MIDAS/GTS NX有限元软件, 建立三维模型进行全过程整体的数值模拟分析, 对比数值模拟结果和监测数据。结果表明: 数值模拟结果与监测数据相比, 两者结果差值较小, 变化趋势基本一致, 验证了有限元数值模拟软件在软土地区深基坑工程中运用具有可行性; 地连墙顶竖向位移和墙顶附近土体沉降受基坑坑底软土隆起的影响较大; 各监测点变形均小于控制值; 基坑周边土体沉降和地连墙体变形符合基坑开挖变形规律, 验证了基坑设计支护的合理性。研究结果可为昆明河湖相软土地区基坑工程提供经验借鉴。

**关键词:** 河湖相软土; 深基坑; 变形; 数值模拟

**中图分类号:** TU473; TU447; P642 **文献标识码:** A

## ANALYSIS OF EXCAVATION DEFORMATION CHARACTERISTICS OF A DEEP FOUNDATION PIT IN FLUVIAL-LACUSTRINE SOFT SOIL AREA

CAI Ying-kun, LI Bo, HE Zi-qi, MA Yun-yan

(Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** In order to study the deformation characteristics of the foundation pit excavation under the complex geological conditions of the fluvial-lacustrine soft soil area in Kunming. During the construction process, the monitoring data of the deformation of the supporting structure and the surrounding soil are used to establish a three-dimensional model of the MIDAS/GTS NX finite element software to carry out the numerical simulation analysis of the whole process, and compare the numerical simulation results with the monitoring data. The results show that the difference between the numerical simulation results and the monitoring data is small, and the deformation trend is basically the same. The feasibility of applying finite element numerical simulation software in deep foundation pit engineering in soft soil area is verified; The vertical displacement of the top of the diaphragm wall and the settlement of the soil near the top of the wall are greatly affected by the uplift of the soft soil at the bottom of the foundation pit the deformation of each monitoring point is less than the control value; The settlement of the soil around the foundation pit and the deformation of the diaphragm wall wall conform to the law of excavation and deformation of the foundation pit, which verifies the rationality of the design and support of the foundation pit. The research

results can provide experience and reference for foundation pit engineering in Kunming fluvial-lacustrine soft soil area.

**Key words:** fluvial-lacustrine soft soil; deep foundation pit; deformation; numerical simulation

近年来,城市建设的快速发展,地铁成为城市交通向着地下发展的一种必然趋势,其中车站深基坑工程是地铁建设中的关键工程<sup>[1]</sup>,深基坑的开挖变形成为了学者研究的热点问题。昆明由于滇池流域和滇池盆地的环境条件,形成了河湖(沼)相沉积等成因类型的软土,使得越来越多的深基坑工程面临软土问题<sup>[2-3]</sup>,但现阶段学者对河湖相软土区基坑开挖研究较少。对于深基坑开挖变形,通常选用岩土工程领域中常用有限元法对基坑开挖的过程进行数值模拟<sup>[4-8]</sup>,利用计算结果和监测数据对基坑开挖变形规律进行研究<sup>[9-10]</sup>。

本文以昆明市盆地河湖(沼)相软土地区某地铁站深基坑工程为例,运用 MIDAS/GTS NX 有限元数值模拟软件建立三维模型进行基坑开挖全过程整体的数值模拟分析,并结合监测数据,验证数值模拟在河湖(沼)相软土应用的可信度,以及软土作用下基坑的变形规律,以期为昆明市盆地河湖(沼)相软土地区类似基坑工程提供经验指导。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑工程

昆明市某地铁深基坑呈东西向布置,开挖深度为 19.71~21.74 m。围护结构为 1 000 mm 厚地下连续墙+内支撑,标准段嵌入基底深度 19 m。地铁站基坑西端盾构嵌入基底深度 19 m,地铁站基坑东端盾构嵌入基底深度 20 m。地铁站基坑 1 轴~7 轴采用三道混凝土支撑,24 轴~27 轴采用四道混凝土支撑,7 轴~24 轴第一道、第三道采用混凝土,第二道、四道支撑采用钢支撑,支护结构剖面图如图 1 所示。

### 1.2 地质条件

该基坑工程处于昆明断陷盆地中部,盘龙江西侧的 I 级阶地上,形成了河湖(沼)相沉积等成因类型的软土,软土厚度大,地层分布复杂,地面以下 70 m 的地层主要由表层填土及其下的第四系冲(洪)积及湖(沼)相沉积层组成,第一层为人工填土层;第二、三大层为第四系冲(洪)积层;第四~六大层为第四系湖沼相沉积。土层物理力学参数见表 1。土层物理力学性质较差,具有高压缩性和软塑的软土

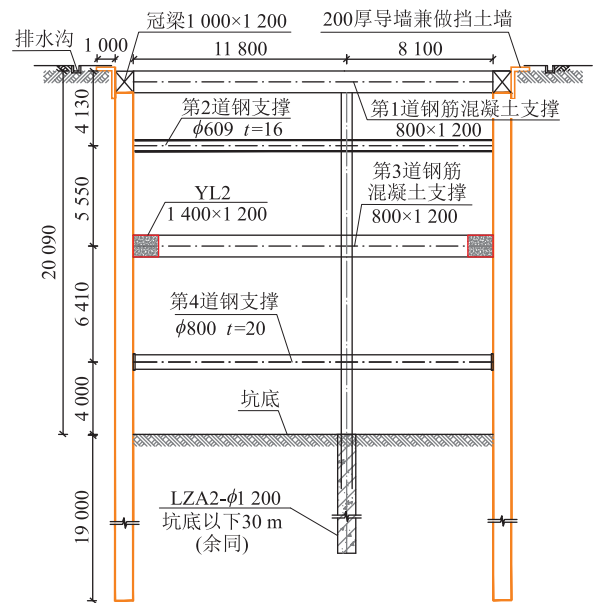


图 1 支护结构剖面图

特征,局部含有泥炭质粘土夹层,符合河湖(沼)相沉积成因类型的软土,产生不良地质作用。

表 1 土层物理力学参数

序号	土层名称	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	压缩模量 E <sub>SI-2</sub> /MPa	泊松比	内摩擦角 /°	内聚力 /kPa
1	①杂填土	1.65	3.88	0.35	10	10
2	② <sub>1</sub> 粉质粘土	1.85	5.82	0.28	15	18
3	③圆砾	2.15	10.50	0.25	29	10
4	④ <sub>1</sub> 粉土	1.95	7.39	0.30	21	10
5	④ <sub>2</sub> 粘土	1.83	6.67	0.28	15	18
6	⑤ <sub>1</sub> 粉土	1.92	7.50	0.30	22	10
7	⑤ <sub>2</sub> 粘土	1.86	7.76	0.28	18	20

### 1.3 基坑监测方案

该工程位于河湖(沼)相软土地区,周边环境复杂,为了保证地铁深基坑开挖工程以及周边环境的安全性,并对开挖施工工程进行指导,主要针对基坑的地连墙变形和周围地面沉降进行监测分析(表 2)。具体的监测内容见监测平面图(图 2)。

表 2 基坑监测项目及控制值

序号	监测项目	累计绝对值 /mm	累计开挖 深度/m	变化速率 /mm·d <sup>-1</sup>
1	支护墙顶竖向位移	25	14	2~3
2	支护墙顶水平位移	25	14	2~3
3	支护墙体水平位移	25	14	2~3
4	周边地表沉降	30	15	2~4

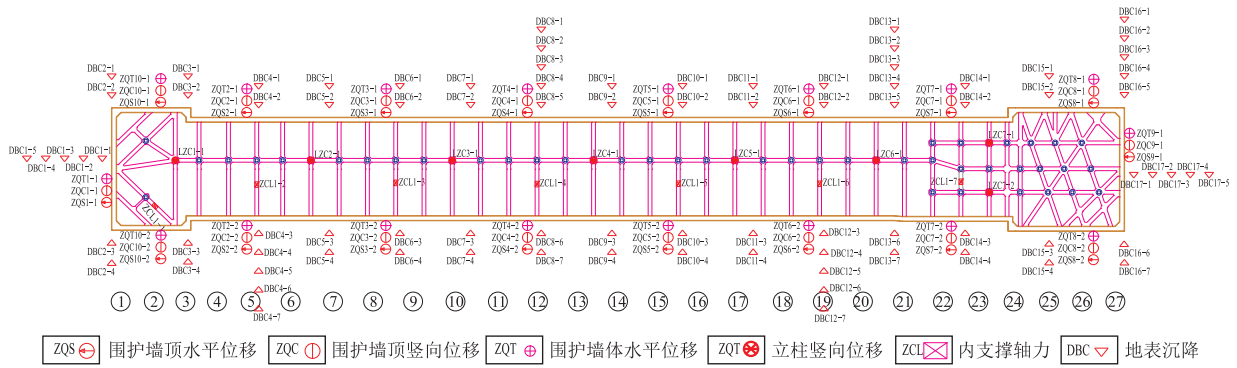


图 2 基坑监测平面布置图

### 1.4 监测结果分析

#### 1.4.1 墙顶水平位移分析

支护墙顶的水平位移是衡量基坑支护结构安全性的重要指标。由于基坑土体的开挖卸荷,导致地连墙两侧土压力产生压力差,从而使地连墙墙顶产生水平位移。根据基坑监测数据,绘制出了不同监测点的墙顶水平累计位移曲线图(图 3)。

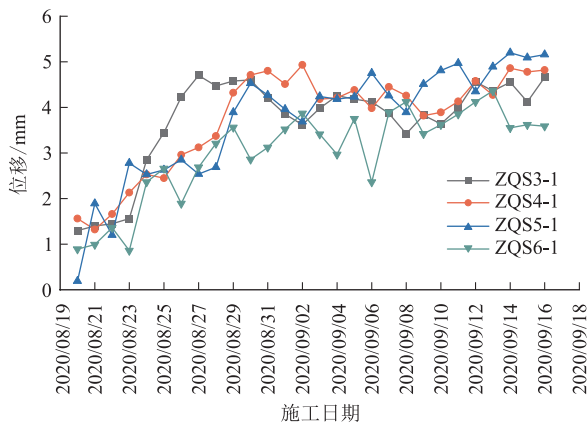


图 3 墙顶水平累计位移曲线图(监测数据)

本文对墙顶水平位移分析主要依据基坑中部监测点 ZQS3-1、ZQS4-1、ZQS5-1 和 ZQS6-1 的实测结果。从图 3 中可以看出,随着基坑施工时间的推移,基坑开挖深度不断增加,墙顶水平累计位移量逐渐增大,9 月 12 日基坑开挖完成后,墙顶水平累计位移变化较小,逐渐趋于稳定。

#### 1.4.2 墙体水平位移分析

根据基坑监测数据,以基坑在完成第四道内支撑施工(工况 6)和基坑完成开挖至坑底 19.71~21.74 m(工况 7)为前提条件,选取了只设置了三道混凝土支撑的监测点 ZQT2-2 和位于基坑中部的监测点 ZQT4-2,研究分析了基坑在不同开挖工况下,地连墙的墙体水平累计位移曲线图(图 4)。从图 4 中可以看出,随着基坑开挖深度的增加,墙体水平位

移不断增大,且最大水平位移不断下移,最大位移为 14.89 mm(深度 14 m),位于监测点 ZQT2-2(工况 7)。由于基坑开挖是一个卸荷的过程,在地连墙外侧土压力不变的情况下,地连墙两侧所受压力差值增大,导致墙体向基坑内移动,差值越大,位移越大。由于地连墙嵌固深度较大,内支撑体系的刚度匹配较好,墙体水平位移均向坑内位移,呈现“正反弯曲线”<sup>[8]</sup>的变形特征。

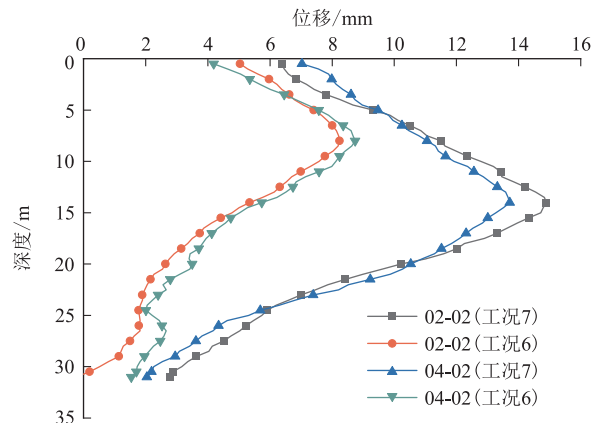


图 4 墙体水平累计位移曲线图(监测数据)

#### 1.4.3 地连墙顶竖向位移

软土地区,土体具有压缩性高、灵敏度高、各土层之间物理力学性质差异大。基坑施工过程中,随着坑内土压力的卸载,坑底上部土压力不断减小,具有压缩性高、灵敏度高的基底软土,由于缺少了上部土压力的约束,坑底软土发生隆起,导致地连墙抬升,使墙顶产生了隆起的正向位移。

根据基坑监测数据,绘制出了基坑墙顶各监测点累计位移曲线图(图 5)。从图中可以看出,随基坑施工时间的推移,在开挖过程中,墙顶竖向累计位移变化较大,为正向位移,且累计位移不断增大,开挖结束后,坑底土压力趋于稳定,墙顶竖向累计位移也基本趋于稳定。表明墙顶竖向位移受坑底软土隆

起因素影响较大。各监测点墙顶竖向累计位移存在差距,但变化趋势基本一致。

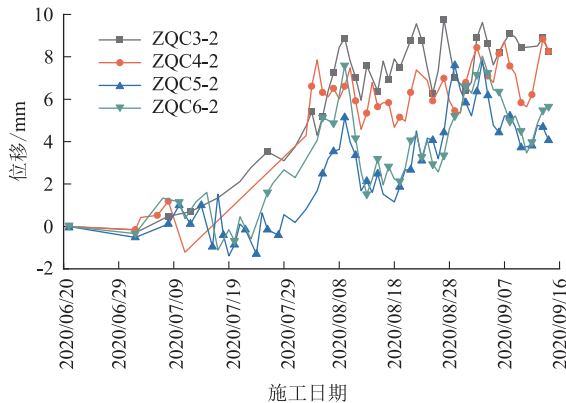


图5 墙顶竖向累计位移曲线图(监测数据)

#### 1.4.4 基坑周边土体沉降分析

根据基坑监测数据,绘制出了基坑周边土体各监测点累计位移曲线图(图6)。从图中可以看出,在距离基坑边1 m处监测点 DBC12-3、9-3,由于受到软土地区坑底隆起和地连墙竖向位移的影响,地连墙附近土体地表位移呈现隆起现象,且随基坑开挖时间的推移位移,基坑开挖深度不断增加,位移不断增大,开挖结束后位移趋于稳定,位移变化趋势趋于一致。从分别距离基坑边1 m、5 m、16 m和22 m处监测点 DBC12-3、4、6、7的监测数据来看,同一时间点,基坑周边土体沉降呈现随着离基坑边距离不断增大,沉降值小的变化趋势,符合基坑开挖周边土体沉降呈现“对号”的变形特征。

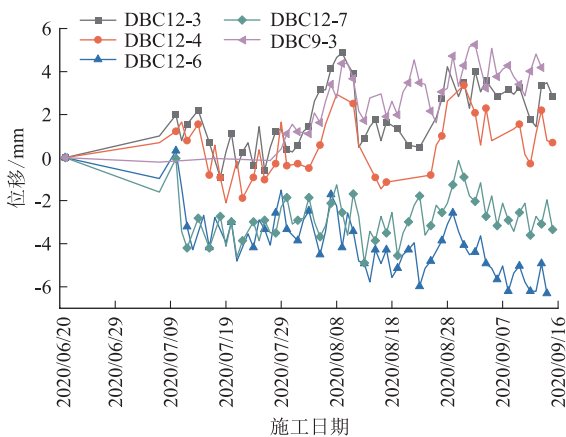


图6 基坑周边土体沉降曲线图(监测数据)

## 2 数值模拟分析

### 2.1 计算模型

对软土基坑开挖建立整体的数值模型。考虑到施工过程中的空间效应,满足忽略边界效应的要求,

模型平面尺寸取基坑平面尺寸和基坑开挖深度的3~5倍,模型的深度取基坑开挖深度的模型3~5倍<sup>[1]</sup>,长、宽、高分别为400 m×200 m×80 m(图7),网格划分采用混合网格生成器,对该基坑附近的网格进行加密,以保证模型的分析更逼近实际情况。计算模型中,共计划分单元41 180个,网格节点58 912个。

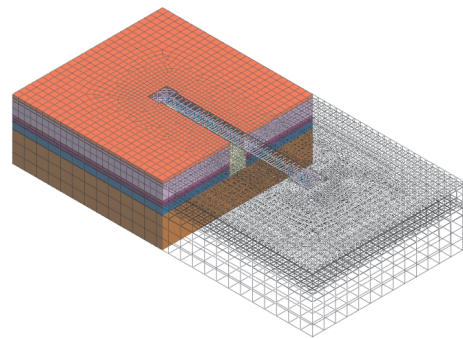


图7 基坑开挖数值模拟模型

Midas/GTS NX 软件提供了15个本构模型,本次研究通过对实际工程的考量选取了修正M-C模型作为本次模拟工程的本构模型<sup>[11]</sup>。修正M-C模型在M-C的基础上考虑了土体刚度与土体所受力状态之间的动态关系,该模型是一种将非线性弹性与塑性结合的组合模型。修正M-C模型能更好地模拟各土层和支护结果的接触关系,所以本次土体本构单元选用修正M-C模型。为了更好地模拟开挖工况,提高计算效率,得到更加逼近实际的结果,具体模型如下:①假设施工场地各土层均呈水平状分布,根据钻孔信息,对土层厚度进行加权平均;②基坑格构柱、各内支撑构件均用梁单元模拟,基坑立柱采用植入式梁单元模拟;③地连墙通过面吸取板单元的形式建立,并建立界面单元和刚性连接;④所用模型,除了顶面取为自由边界,其余面均采取法向约束或全约束;⑤对模型中的格构柱、立柱进行RZ方向的约束。

### 2.2 模拟工况

根据地勘报告,基坑结构材料和基坑围护桩材料均为C30混凝土,格构柱材料为Q235B。计算模型中各材料参数取值见表1和表3。

表3 结构材料参数取值表

材料名称	弹性模量 /kN·m <sup>-2</sup>	泊松比	容重 /kN·m <sup>-3</sup>
C30混凝土	3.1×10 <sup>7</sup>	0.2	23.5
钢材	2.1×10 <sup>8</sup>	0.3	78.5

通过在计算模型中设定施工阶段组来模拟基坑开挖施工工况,分步激活相应网格组以实现初始阶

段及围护结构的建立,分步钝化开挖土体网格组以实现基坑分层开挖,施工模拟工况分为以下7个工况,①工况1:初始应力场分析,设置位移清零;②工况2:基坑围护结构进行施工;③工况3:基坑开挖至1.7 m,第一道内支撑施工;④工况4:基坑开挖至5.6 m,第二道内支撑施工;⑤工况5:基坑开挖至11.4 m,第三道内支撑施工;⑥工况6:基坑开挖至17.6 m,第四道内支撑施工;⑦工况7:基坑开挖至坑底(19.71~21.74 m)。

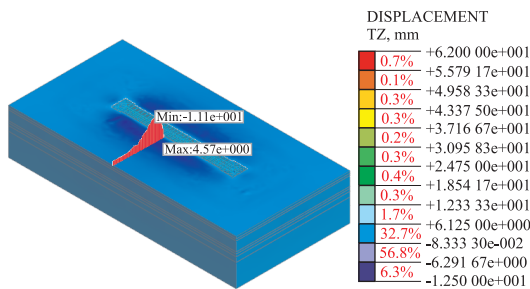


图8 数值模拟竖向位移云图(工况7)

为了后续更好地与监测数据对比分析,此次墙顶水平位移和墙体水平位移数值模拟计算结果的提取点主要是根据基坑监测平面图(参见图2)上对应的监测点来提取计算结果。而基坑周边土体沉降计算结果提取的位置位于基坑南侧中部地表垂直于基坑边,并距基坑边0 m至模型边界处。数值模拟计算结果中的部分云图如图8所示。

## 2.3 数值模拟结果分析

### 2.3.1 地连墙顶竖向位移分析

从数值模拟结果中,选取工况7来分析墙顶南北两侧竖向位移情况(图9),从图中可以直观地看出,墙顶处于隆起状态,最大值为7.5 mm,位于基坑南侧中部,位移由中部向两侧逐渐减小。符合软土地区基坑坑底隆起,导致地连墙顶隆起的变形特征。

### 2.3.2 地连墙水平位移分析

根据数值模拟结果,在不同工况下,选取了基坑

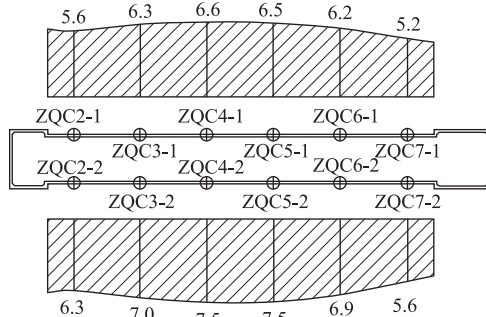


图9 墙顶竖向位移曲线图(工况7)

中部墙体位移进行具体的变形规律分析(图10)。从图10中可以看出,随着基坑开挖深度的不断增大,墙体水平位移不断增大,最大位移不断下移,均向基坑内位移,最大位移14.17 mm(深度14 m)。在基坑开挖深度小于11.6 m时,由于地连墙嵌固深度较大,基坑开挖深度总体较小,墙体水平位移主要呈现“前倾型”变形特征;当开挖深度大于11.6 m时,墙体水平位移变化规律由“前倾型”变为“正反弯曲型”。

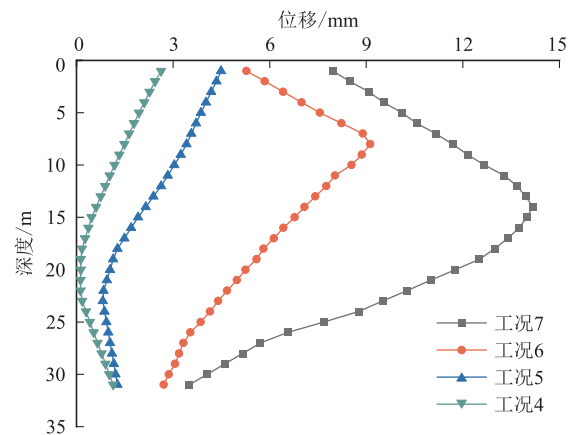


图10 墙体水平位移随工况的变化曲线图

### 2.3.3 基坑周边土体沉降分析

在不同工况下,基坑周边土体沉降随基坑开挖深度不断变化(图11)。从图11中可以看出,随着开挖深度的增加,基坑周边土体沉降不断增大,且距地连墙距离由近到远,基坑地表沉降量是先增大,后减小,最大沉降量为11.1 mm,位于0.5 H处(H为基坑开挖深度),沉降曲线呈现“对号”形式。基坑开挖对周边的影响是有限的,从图11中可以看出,本次基坑开挖的影响范围为3 H。图11中距离地连墙1~2 m处,周边土体随基坑开挖深度不断增加,土体隆起量不断增大,主要是软土地区,坑底隆起,引起地连墙及其附近土体发生轻微隆起。

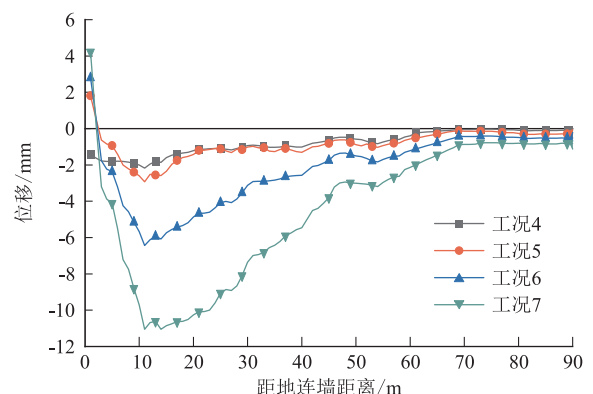


图11 基坑周边土体沉降曲线图

### 3 数值模拟与监测数据对比分析

监测数据是来自现场实测,是施工现场的直观真实反馈,为了表明数值模拟的可信度,以及数值模拟结果和监测数据的差距,对两个结果进行对比分析。由于监测数据是由监测点的实测数据获得,呈现出的是监测点在多工况下的变形情况。而数值模拟能呈现出在不同工况下模拟对象整体连续的变形情况。因此,为了更好地对比分析,选用监测数据和模拟结果都有连续性的地连墙体水平位移进行对比分析(图12)。

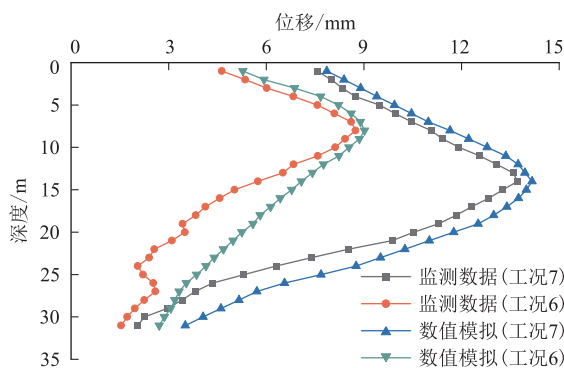


图12 墙体水平位移对比曲线图

从图12中可以看出,数值模拟结果与监测数据不一致,差值较小,这是因为在基坑进行数值模拟建模时,为了提高运算效率,对模型进行了简化,对周边环境影响因素考虑有限。在不同工况下,数值模拟结果与监测数据变化趋势基本一致,且数值模拟结果大于监测数据,最大值差值为0.45 mm(工况7),差值较小,两者的值均小于变形控制值。表明了有限元数值模拟软件在软土地区基坑工程中的应用的可信度较高,具有可行性。

### 4 结论

本文结合昆明市河湖相软土地区工程实例,通过监测数据整理和数值模拟,分析了软土地区基坑

开挖的变形特征。并将模拟结果和监测数据进行对比分析,得出以下结论:

(1) 在基坑开挖卸荷中,地连墙顶竖向位移和墙顶附近土体沉降受坑底软土隆起的影响因素较大。

(2) 在基坑开挖工程中,墙体水平位移呈现“正反弯曲线”的变形特征;基坑周边土体沉降呈现“对号”的变形特征;变形最大值均小于控制值。

(3) 数值模拟结果与实际监测数据相比,两者结果并不完全一致,但差值较小,变化趋势基本一致,且数值模拟结果均大于监测数据,表明有限元数值模拟软件在软土地区深基坑工程中运用具有可行性。

### 参考文献

- [1] 尹利洁,李宇杰,朱彦鹏,等.兰州地铁雁园路站基坑支护监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2021,43(S1):111-116.
- [2] 杨发海.昆明湖沼相软土地区深基坑支护及数值模拟研究[D].中国地质大学(北京),2017.
- [3] 徐建涛.多期软土地区深基坑支护及位移控制方案探讨[J].地质灾害与环境保护,2021,32(2):62-65.
- [4] 陈颖辉,马贺雅.复杂条件下昆明某桩锚支护基坑环境影响分析[J].工程勘察,2017,45(6):13-18+23.
- [5] 管涛,孙世国,江俊,等.北京某小区复杂环境下深基坑支护技术及变形研究[J].建筑结构,2021,51(S2):1509-1513.
- [6] 王琳,罗志华,张晗.地铁车站深基坑开挖对临近建筑物影响的三维有限元分析[J].建筑结构,2021,51(S1):1928-1934.
- [7] 杨东雷,李杰,曹生辉,等.深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响分析[J].建筑结构,2022,52(S1):2554-2560.
- [8] 薛圣川.软土深基坑组合式内支撑支护结构变形机理研究[D].云南大学,2020.
- [9] 高利军.邻近建筑物基坑开挖变形的特性分析及控制[J].工程勘察,2022,50(3):14-21+78.
- [10] 朱怡巧.软土地区基坑开挖对既有地铁隧道影响分析[J].建筑结构,2022,52(S1):2561-2567.
- [11] 蔡映坤,李波,王明山.某超期服役基坑安全性分析评价[J].地质灾害与环境保护,2022,33(2):72-77.

作者简介: 蔡映坤(1996—),男,硕士研究生,从事地质、岩土工程等方面的研究。E-mail:1978957912@qq.com

通信作者: 李波(1964—),男,博士,教授。研究方向:矿场地质学。E-mail:libo1964@sina.com