

[文章编号] 1003-4684(2023)02-0066-08

# 分期施工基坑开挖变形特征与数值模拟分析

邓 伟, 范 瑛, 赵富财, 熊熙熙

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 为研究分期施工过程中二期基坑开挖变形的特性及规律,以武汉市轨道交通 11 号线东段工程光谷线网控制中心工程为例,通过现场监测和使用 Plaxis3D 数值模拟相结合的方法,分别对地表沉降、桩顶沉降、桩顶水平位移、桩体水平位移和建筑物沉降进行了数据监测和模拟最后将监测结果和模拟结果对比分析,来研究二期基坑施工过程中基坑变形特性。结果表明:基坑周围围护结构变形随着基坑开挖深度的增大呈现出隆起和沉降两种不同的变化趋势,基坑开挖到达最深时地表沉降和围护结构的位移达到最大,最后随着基坑主体结构的完善而趋于稳定;二期基坑施工过程中基坑开挖变形最大处位于一期和二期支护结构公共处,在水平方向由支护结构公共处中心位置向两端减少,垂直方向由支护结构公共处中心位置到基坑底部变形量从大到小变化,呈现出中间大两头小的变化特征。计算分析表明数值模拟结果与现场监测结果变化趋势一致,计算数据与监测数据差距较小,为基坑工程的合理设计与安全施工提供了科学依据。

**[关键词]** 分期施工; 基坑开挖; 变形监测; 数值模拟

**[中图分类号]** TU74 **[文献标识码]** A

随着现代城市的发展,基坑的规模也在不断扩大,基坑的深度和施工难度也在不断增加。深基坑工程的研究在城市建设中尤为重要。基坑施工过程中恶劣的地理条件和复杂环境会对基坑的安全稳定造成影响<sup>[1,2]</sup>,不同的施工工艺、不同的功能和不同开挖形状的基坑也会对基坑的变形造成不同的影响<sup>[3-5]</sup>。针对在不同环境和支护结构下基坑开挖后基坑的变形已经有许多学者展开了大量的研究。刘畅<sup>[6]</sup>和李镜培<sup>[7]</sup>等分析了不同位置及不同长度的坑底桩基在开挖过程中的受力和变形规律。李涛等<sup>[8]</sup>通过研究桩间距、桩半径、距径比、摩擦系数等因素对桩土相互作用力的影响分析,得到了随着桩距径比的增加,桩土相互作用力逐渐减小,而桩间土受力线性增大;桩土相互作用力随摩擦系数增加而近似线性增大的变形规律。刘念武<sup>[9]</sup>和楼春晖<sup>[10]</sup>等深入研究了软土地区基坑开挖引起围护结构及邻近建筑的变形特性。程康<sup>[11]</sup>等以杭州某 30.2 m 深大基坑工程为研究对象,提出了基于基坑开挖面积与地连墙最大侧移之间的经验关系式。叶帅华<sup>[12,13]</sup>等的研究表明,在开挖过程中,基坑支护结构、基坑周围土体和邻近建筑三者变形相互影响,桩顶水平位移和竖向位移随着基坑的开挖由小变大逐渐趋于稳

定。为了更加全面地研究基坑开挖过程中基坑、围护结构和邻近建筑的变形规律,将现场监测与数值模拟<sup>[14-19]</sup>相结合来分析支护结构的稳定性和基坑的变形特性,提高了基坑在施工过程中的安全性,并为施工提供了一定的指导意义。

上述关于基坑开挖基坑支护体系、地表及邻近建筑物构筑物变形特性的研究已经取得了大量较全面的研究成果,现有的成果大多集中在三个方面,即理论分析、数值模拟分析和现场监测分析,而关于基坑分期施工且基坑一侧支护两期共用复杂施工环境变形特性的研究较少。鉴于此,本文以武汉市轨道交通 11 号线东段工程光谷线网控制中心工程为例,通过对监测点的布控和地表竖向位移、桩顶沉降、桩顶水平位移、建筑物沉降的现场监测数据分析和有限元数值模拟,分析在既有一期工程完成的基础上进行二期基坑开挖过程中复杂环境下深基坑变形的规律及变形特征。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

本工程位于武汉市光谷火车站附近佳园路与海纳路的交叉口,为一栋包含办公、轨道交通指挥中

[收稿日期] 2021-11-15

[基金项目] 国家自然科学基金(51974289)

[第一作者] 邓 伟(1997-),男,湖北恩施人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为道路与桥梁工程

[通信作者] 范 瑛(1969-),女,湖北黄冈人,湖北工业大学教授,研究方向为道路与桥梁工程

心功能的超高层办公楼。总用地13 379.55 m<sup>2</sup>,总建筑面积64 900.24 m<sup>2</sup>。地下室为2层,地上23层,建筑高度99.45 m。地下室2层为汽车停车库及设备用房;1~5层为轨道交通控制中心设备及办公用房;6~23层为办公用房。本基坑拟分期施工,共分为一期与二期,先施工西侧的控制中心大厅一期,待控制中心大厅施工完成后再施工东侧的控制中心办公楼二期,本次研究为二期的控制中心办公楼。基坑底相对标高-14.55 m~-11.25 m,考虑混凝土垫层厚100 mm,基坑开挖深度为9.05~17.55 m。其中西侧为裙房结构,已经施工完成并投入使用,且西侧靠一期部分支护桩在一期施工过程中已经施工完成。总平面图如图1所示。

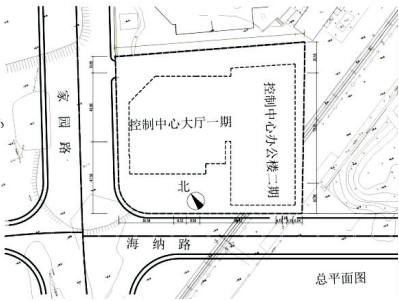


图 1 总平面图

1.2 支护结构方案设计

施工场地高差起伏较大,基坑支护体系北侧采用钻孔灌注桩+两道砼内支撑的永临结合支护形式,其中北侧采用双排  $\varphi 1000@1400$  围护桩,前后排桩间距为3.00 m,双排支护桩兼做挡土墙用,后期不拆除,直接用作施工正式围墙;东侧和南侧均采用单排  $\varphi 1000@1400$  钻孔灌注桩+一道混凝土内支撑的支护方式;西侧因一期和二期支护结构公共采用单排  $\varphi 1000@1400$  钻孔灌注桩+桩间搭接直径800 mm的高压旋喷桩+一道混凝土内支撑的支护的支护方式。

1.3 工程地质

现场地质情况如表1所示。

1.4 基坑开挖施工工况

本工程在基坑开挖前,首先施工基坑支护结构,在整个土方施工过程分为三次土方开挖。

第一次土方开挖:基坑北侧自然地面至第一道内支撑-1.30 m处;

第二次土方开挖:第一道内支撑至第二道内支撑-6.35 m处;

第三次土方开挖:第二道内支撑至基坑底标高-10.15 m处。

表 1 地层参数

层号	厚度/m	名称	天然重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\Phi/(\text{^\circ})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$
①	10.72	杂填土	18.9	10	13	2
②	2.40	粘土	19.4	37	16	4
③	1.50	残破积黏土	19.0	31	14	5
④	1.60	强风化泥岩	23.0	20	25	300
⑤	9.00	中风化泥岩	24.6	0	45	500

2 监测方案

2.1 监测项目

为了确保项目的安全与稳定同时也能获得更加全面的监测信息来反应基坑的变形特性,在开挖过程中将对以下5项进行现场监测:1)地表沉降;2)桩顶沉降;3)桩顶水平位移;4)桩体水平位移;5)建筑物沉降。

2.2 监测点布置

根据监测基准点不应少于3个的监测原则,为全面反应基坑变形的特性保证在基坑每边设置一个不同监测指标的监测点,同时也避免监测数据的偶然性影响变形规律的普遍性。一期和二期公共处是施工区监测点,容易破坏,故不设置监测点。本项目选取了部分有代表性的监测点进行监测和数据分析,基坑测点布置图如图2所示。

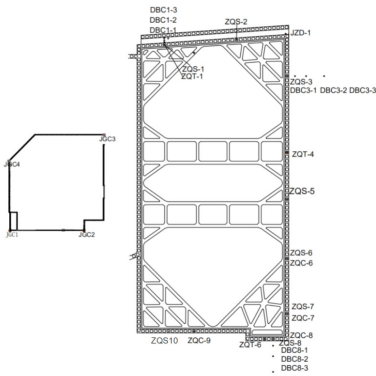


图 2 基坑测点布置图

3 基坑监测数据分析

本文数据选取2020年10月24日至2021年01月02日,第二次土方开挖至基坑底板混凝土浇筑完成时段的监测数据,重点分析二期基坑开挖过程中基坑围护结构变形及对周围地表沉降的影响。通过

统计各测点的监测数据,统计出变形最大值的监测点变化值。详细数据如表 2 所示。

表 2 监测数据最大值统计

监测项目	测点号	阶段变形最大值/mm	累计变形值最大值/mm	阶段变形速率/(mm·d <sup>-1</sup> )	累计变形值控制值/mm	变形速率控制值/(mm·d <sup>-1</sup> )
地表竖向位移	DBC3-1	+0.70		+0.10	±30.0	±3.00
	DBC8-2		-6.58	-0.01	±30.0	±3.00
桩顶沉降	ZQC7	-0.64		-0.09	±30.0	±3.00
	ZQC9		-6.38	-0.01	±30.0	±3.00
桩顶水平位移	ZQS2	-0.50		-0.07	±40.0	±3.00
	ZQS2		-3.20	-0.07	±40.0	±3.00
桩体水平位移	ZQT4	+2.95		+0.42	±40.0	±3.00
	ZQT1		+17.86	+0.31	±40.0	±3.00
建筑物沉降	JGC4	-0.34		-0.05	±20.0	±2.00
	JGC4		-3.49	-0.05	±20.0	±2.00

3.1 地表沉降分析

10月26日至11月18为第二次开挖;11月20日至12月15日为第三次开挖。基坑开挖的施工过程中,开始施工阶段基坑周边地表沉降点变化速率较大,变形量也逐渐增加。在此过程中地表的的变化不只表现在沉降,还存在隆起现象。通过选取地表沉降点 DBC3-1、DBC3-2、DBC3-3, DBC1-1、DBC1-2、DBC1-3 对比分析。随着时间的推移,开挖深度的加大,地层沉降的速率增大,累计沉降逐渐增大,随着内部结构的施工完成,变形逐渐趋于稳定。截止 2021 年 01 月 02 号累计变形值最大的测点为 DBC8-2, 累计变形值为 -6.58 mm (控制值 ±30 mm),处于正常状态。基坑施工阶段地表监测点沉降变化如图 3 所示。

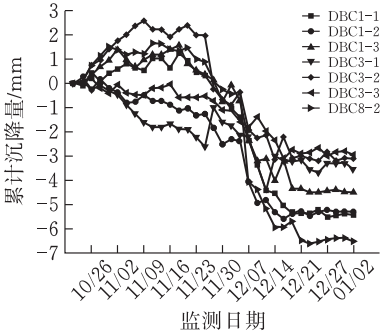


图 3 地表沉降时程曲线图

3.2 桩顶沉降分析

截止 2021 年 01 月 02 号累计变形值最大的测点为 ZQC9, 累计变形值为 -6.38 mm (控制值 ±30 mm),处于正常状态。基坑施工阶段桩顶沉降时程曲线图如图 4 所示。

从整个曲线变化分析可知,在基坑开挖的施工过程中桩顶整体沉降波动变化趋于稳定。2020 年 12 月 05 号基坑开挖结束后,由于桩体周围的土体被挖走,失去土体的约束,桩顶沉降量出现较大波动。由图明显看出 ZQC9 监测点的桩顶沉降一直增

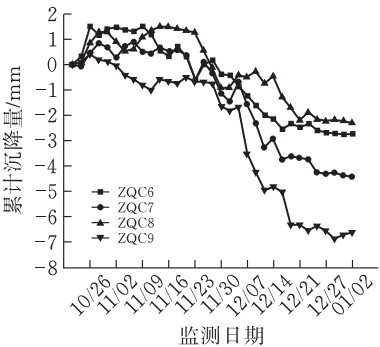


图 4 桩顶沉降时程曲线图

大,在监测后期位移减小,这是由于 ZQC9 测点周围出现建筑物材料的堆载,致使坑侧荷载值超过设计荷载,坑侧压力增大,桩顶竖向位移增大,后期堆载消失桩顶竖向位移保持稳定不再增加。总体变化呈现出先隆起后沉降,到基坑结构完善沉降趋于稳定。监测点 ZQC7 最大阶段变形速率为 -0.09 mm/d, 沉降量累计变形值最大的测点为 ZQC9, 累计变形值为 -6.38 mm (控制值 ±30 mm),阶段变形速率 -0.01 mm/d,均在设计控制值范围内。

3.3 桩顶水平位移

2020 年 10 月 24 日至 2020 年 12 月 05 日处于基坑开挖阶段,基坑开挖阶段桩顶水平位移波动范围较小,基坑开挖结束后基坑内侧桩身失去了土地对桩身的作用,其开挖过程就是应力释放过程,即由开挖前的静态平衡发展到动态平衡的状态。水平位移如图 5 所示, ZQS1、ZQS2 位于基坑的北侧, ZQS8、ZQS10 位于基坑的南侧两侧的水位移表现出隆起和沉降两种不同变化趋势,说明桩顶水平位移表现出了明显的“时空效应”。其间测点 ZQS2 最大阶段变形值为 -0.50 mm, 变形速率为 -0.07 mm/d,水平位移量累计变形值最大的测点为 ZQS2, 累计变形值为 -3.20 mm,阶段变形速率 -0.07 mm/d,均在设计控制值范围内。

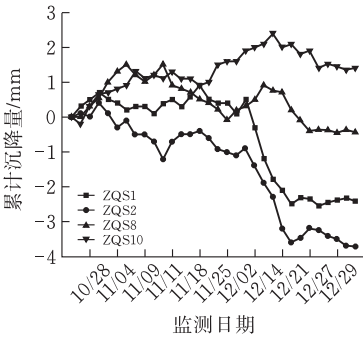


图 5 桩顶水平位移时程曲线图

3.4 桩体水平位移

在基坑开挖整个过程采用中刚度较大的混凝土支撑,围护结构为钻孔灌注桩,支撑对围护结构刚度变形表现出较好的约束作用,从图中可以看出桩体水平位移在开挖阶段数据波动较大,开挖结束后变化稳定,如图 6 所示。2020 年 11 月 25 日开挖深度最大至 8 m,桩体在 0~8 m 变化幅度最大,随着基坑开挖深度的增加,土体应力释放,基坑周围土体发生位移,使得桩体的水平位移逐渐增大,桩身的整个位移随着桩身深度的增加而减小,当基坑周围土体与基坑支护结构达到应力平衡时变形减缓。基坑开挖结束后桩体水平位移趋于稳定。在基坑开挖过程中累计变形值最大的测点为 ZQT01,累计变形值为 +17.86 mm,变形速率+0.31 mm/d,均在设计控制值范围内。

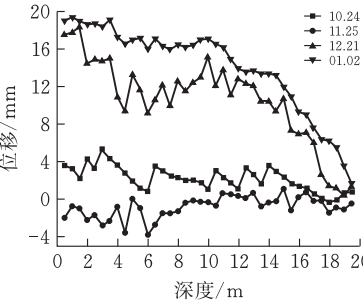


图 6 ZQT1 位移及深度分布图

3.5 建筑物沉降分析

建筑物的沉降变化规律与地表沉降规律相似,曲线都呈现出隆起和沉降两种形式,在开挖过程中变化最大的阶段在 2020 年 11 月 15 日附近,该阶段是基坑开挖到达最深至 8 m 处,测点累计变形也逐渐增加。沉降点 JGC1、JGC4 离基坑较远沉降变化缓慢波动较小,沉降点 JGC2、JGC3 距基坑较近且与一期工程相邻变化幅度较大。JGC4 是沉降量累计变形值最大的测点,累计变形值为-3.49 mm,阶段变形速率-0.05 mm/d,变化范围均在可控范围之内。建筑物沉降时程曲线如图 7 所示。

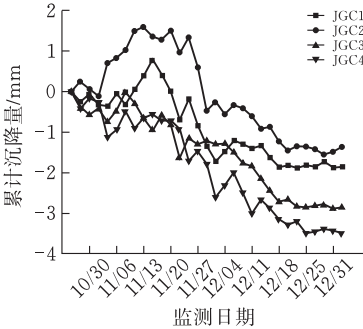


图 7 建筑物沉降时程曲线图

4 有限元数值模拟分析

4.1 计算假定与基坑模型的建立

本文采用有限元软件 Plaxis3D 对基坑的施工工况进行模拟。模型主要由包括梁、土层、板构成,参数表如表 1、3 所示。土层采用软件中 HS-small 本构模型,为更加真实准确的到达模拟效果,灌注桩采用板单元模拟,通过刚度等效转化换算得到板的有效厚度。具体换算公式如下:

$$\frac{1}{12}(D+t)h^3=\frac{1}{64}\pi D^4$$

表 3 结构构件计算参数

构件名称	材料属性	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
冠梁	C30	30000	0.30
板	C30	35000	0.20

本工程围护结构为依次排列的钻孔灌注桩,由设计图纸桩体分布图可知  $D=1\text{ m}$ ,  $t=0.4\text{ m}$ ,根据换算公式得到  $h$  约为 0.75 m,桩体刚度折算如图 8 所示。充分考虑基坑开挖对边界的影响,则侧向边界不小于 4 倍的开挖深度,下边界则需根据土层决定,一般选择较坚硬、稳定性好的土层作为下边界深度不小于 3 倍的开挖深度,所以模型尺寸为 170 m  $\times$  170 m  $\times$  30 m。赋予结构单元参数,利用 Plaxis3D 建立有限元模型,基坑模型如图 9 所示。

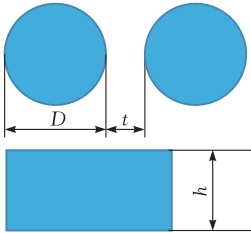


图 8 桩体刚度折算示意图

4.2 施工步骤模拟

通过 Plaxis3D 中“分阶段施工”的板块,激活或者冻结单元的功能来模拟实际施工的过程。详细施工步骤如表 4 所示。

4.3 计算结果分析

现场数据监测是从三次开挖阶段中的第二次开



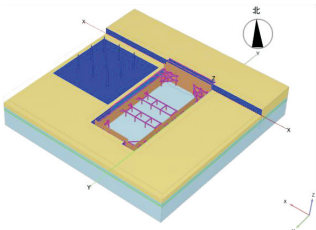


图 9 基坑模型图

挖进行的,不能通过实测数据来完整分析整个开挖过程中基坑的变形情况,而数值模拟能很好模拟整个施工过程,更加清楚了解开挖过程中土体沉降、围护结构位移变化情况。

表 4 基坑开挖工况

工况	开挖工况说明
阶段 1	基坑围护结构钻孔灌注桩及冠梁施工
阶段 2	待围护结构混凝土达到设计强度后,开挖到达第一道砼支撑底面标高位置,平整地面
阶段 3	装模现浇腰梁和第一道砼支撑
阶段 4	待支撑混凝土强度达到后,继续放坡开挖,到达第二道砼支撑底面标高位置后,进行砼腰梁及第二道砼支撑施工
阶段 5	装模现浇冠梁和第二道砼支撑
阶段 6	待第二道支撑混凝土强度达到后,继续放坡分区开挖,到达底板底面标高 0.3 m 以上位置,由人工进行基坑最后 0.3 m 的修整

**4.3.1 土体沉降变形分析** 在基坑逐步开挖的过程中,土体的变形也在不断增加,阶段 2 坡面土体开挖至基坑水平开挖面时,由于土体卸荷在开挖面附近产生一定的土体隆起现象,开挖面产生了 1 mm 左右的变形,随着阶段 3 现浇腰梁和第一道混凝土支撑的施工,土体变形减少逐步稳定。阶段 4~6 土体继续开挖变形也逐步加大,受到基坑西侧一期工程裙房结构的影响,基坑西侧一期和二期工程公共处土体变形最大,在水平方向由支护结构公共处中心位置向两端减少,垂直方向由支护结构公共处中心位置到基坑底部变形量从大到小变化,呈现出中间大两头小的变化特征。土体沉降位移云图如图 10、土体沉降剖面位移云图如图 11 所示。

4.3.2 围护结构位移分析

1)总位移 从图中看出围护结构在阶段 3 土体开挖前基坑西侧围护结构顶部出现变形主要是受到一期工程的影响。随着基坑开挖深度的增加,维护结构的变形也在不断增加,北侧由于坡面土体的移除使得双排钻孔灌注桩成为挡土结构,受到土的壓力不断增加变形也随着增大;西侧围护结构处于一期和二期的公共处变形量最明显,同时在整个开挖阶段基坑长边的围护结构变形量都要大于基坑短边的围护结构变形量;由于边角处受两侧土体及维护

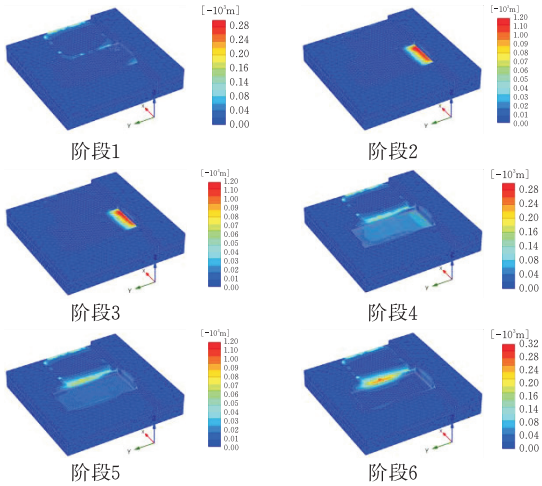


图 10 土体沉降位移云图

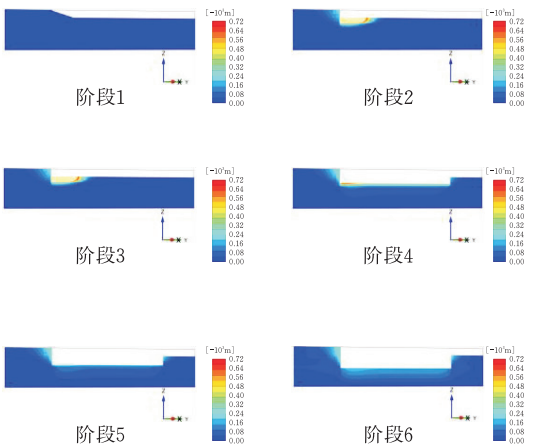


图 11 土体沉降位移剖面云图

结构的约束作用较大,且边角处围檩的约束作用也较大,从变形位移云图上看岀基坑的角边缘处受开挖变形影响很小(图 12)。

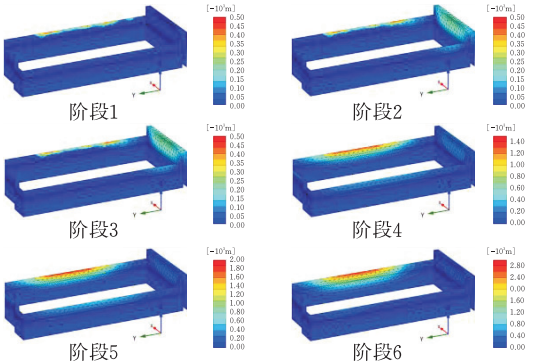


图 12 围护结构总位移云图

2)水平位移 围护结构的水平位移主要集中在基坑的东西两侧和北侧的双排围护桩结构处。随着基坑开挖深度的不断增加土体向坑内挤压,导致基坑围护结构向基坑内产生位移也不断增加;随着开挖深度的增加,北侧双排围护桩结构的变形范围下移且不断增大,由于坡体开挖导致围护结构前端卸荷,失去了一部分抵抗后端土体的土压力,使得位移

量最大区域集中在双排围护结构的中上部位。如图 13、图 14 围护结构  $x$  方向位移云图、围护结构  $y$  方向位移云图所示。

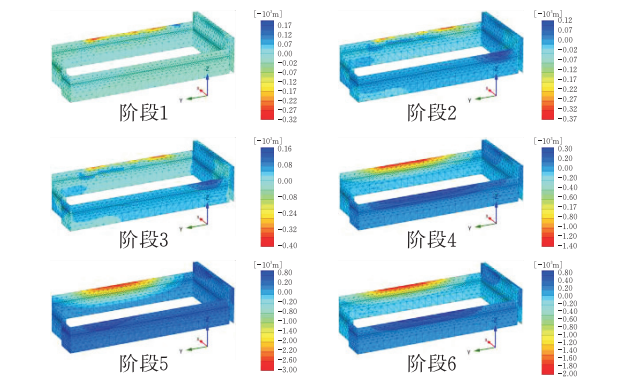


图 13 围护结构  $x$  方向位移云图

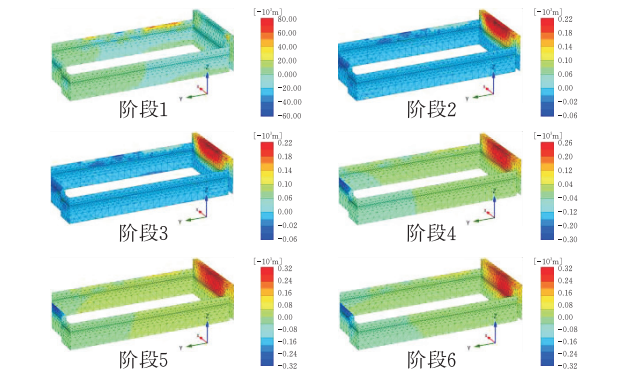


图 14 围护结构  $y$  方向位移云图

#### 4.4 数值模拟结果与现场实测数据对比分析

为了更好地研究分期施工过程中二期基坑开挖变形的特性及规律,将数值模拟结果与现场实测数据对比分析,更加全面地反映出在不同工况开挖阶段的变形。土体沉降现场监测数据表明开挖前期土体呈现隆起现象,数值模拟阶段在阶段 3 即坡体土体开挖阶段破坏了土体初始平衡条件,呈现出开挖面大范围的土体上浮。围护结构变形现场监测能很好反映单个监测指标的变化情况,不能反应变形范围的大小,结合数值模分析围护结构在开挖过程中变形范围主要集中在荷载集中区,影响范围约为结构作用面的三分之一,如基坑一期和二期交界处和双排挡土结构处。土体沉降和基坑围护结构的变形主要受分步开挖深度、基坑开挖宽度和基坑边界约束条件改变的影响,其次是受支护设计方案和周围施工环境的影响。为说明模拟的有效性分别选取地表沉降点 DBC1-2 和 DBC3-2、建筑物沉降点 JGC4、桩体 ZQT1 进行对比,模拟结果如图 15—17 所示。实测数据比模拟数据偏大,其原因在于模拟数据没有考虑现场施工环境、天气变化和开挖后时空效应的影响。总体来说实测数据与模拟数据变形趋势基本一致,说明有限元模拟能较好的还原施工开挖情况,

可以为以后实际施工提供参考和指导及时发现问题调整施工方案提高施工的安全性和稳定性。

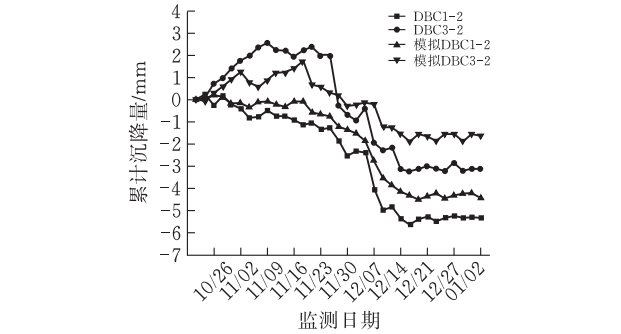


图 15 地表沉降实测与模拟数据对比图

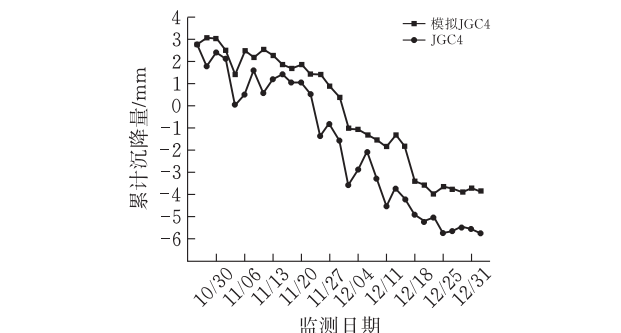


图 16 建筑物沉降实测与模拟数据对比图

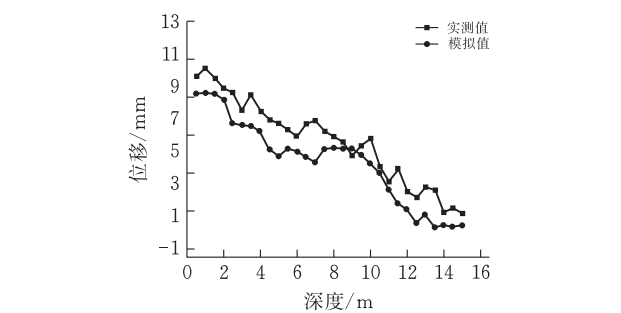


图 17 ZQT1 水平位移及深度实测与模拟数据对比图

## 5 结论

本文通过武汉市轨道交通 11 号线东段工程光谷线网控制中心二期工程基坑现场监测与数值模拟的方法来分析分期施工过程中二期基坑的变形特征,实际工程受周边环境、可变荷载、施工机械和时空效应等因素的影响,现有数值模拟无法将各个参数的影响进行模拟,使得计算值小于监测值,但是数值模拟结果与监测结果变化规律基本一致,得出以下结论:

1)分期施工过程中二期基坑开挖土体变形最大处位于一期和二期公共处;基坑周围维护结构及土体变形随着基坑开挖深度的增大呈现出隆起和沉降两种不同的变化趋势,基坑开挖到达最深处变形达到最大,最后随着基坑主体结构的完善而趋于稳定,阶段变形速率平均保持在 $\pm 0.05\text{ mm/d}$ (变形速率

控制值 $\pm 3\text{ mm/d}$ 。

2)在地形起伏明显、高差较大的坡形开挖面场地采用双排钻孔灌注桩+混凝土内支撑的永临结合的支护方式;在支护结构公共处采用单排钻孔灌注桩+桩间搭接的高压旋喷桩+混凝土内支撑的支护方式,桩顶水平位移和桩体水平位移累计最大变形值分别为 $-3.2\text{ mm}$ 和 $+17.86\text{ mm}$ (累计变形值控制值 $\pm 30\text{ mm}$ ),研究表明这两种支护方式是合理的,对基坑土体的变形起到了良好的限制作用,保障了基坑的稳定性。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] SUN H, CHEN Y, ZHANG J, et al. Analytical investigation of tunnel deformation caused by circular foundation pit excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 193-198.
- [2] SONG D, CHEN Z, DONG L, et al. Monitoring analysis of influence of extra-large complex deep foundation pit on adjacent environment: a case study of Zhengzhou City, China [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(01): 2036-2057.
- [3] DING Z, JIN J, HAN T C. Analysis of the zoning excavation monitoring data of a narrow and deep foundation pit in a soft soil area[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(04): 1231-1241.
- [4] TAN Y, ZHU H, PENG F, et al. Characterization of semi-top-down excavation for subway station in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68: 244-261.
- [5] TAN Y, WANG D. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1875-1893.
- [6] 刘畅,郭悦,郑刚,等.深基坑开挖对坑底桩受力变形特性的影响研究[J].建筑结构学报,2021,42(05):177-186.
- [7] 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(02):208-217.
- [8] 李涛,朱连华,李彬如,等.深基坑开挖土拱效应影响因素研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(01):58-65.
- [9] 刘念武,陈奕天,龚晓南,等.软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J].岩土力学,2019,40(04):1515-1525.
- [10] 楼春晖,夏唐代,刘念武.软土地区基坑对周边环境空间效应分析[J].岩土工程学报,2019,41(S1):249-252.
- [11] 程康,徐日庆,应宏伟,等.杭州软黏土地区某30.2m深大基坑开挖性状实测分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(04):851-863.
- [12] 叶帅华,李德鹏.复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析[J].土木工程学报,2019,52(S2):117-126.
- [13] 叶帅华,丁盛环,龚晓南,等.兰州某地铁车站深基坑监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2018,40(S1):177-182.
- [14] 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.
- [15] 李四维,高华东,杨铁灯.深基坑开挖现场监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2011,33(S1):291-298.
- [16] 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.
- [17] 刘杰,姚海林,任建喜.地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J].岩土力学,2010,31(S2):456-461.
- [18] 吴意谦,朱彦鹏.兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J].岩土工程学报,2014,36(S2):404-411.
- [19] 韩健勇,赵文,李天亮,等.深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析[J].工程科学与技术,2020,52(04):149-156.

## The Second Stage Excavation Deformation Characteristics in Staged Construction and Numerical Simulation Analysis

DENG Wei, FAN Ying, ZHAO Fucui, XIONG Xixi

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to study the deformation characteristics of the second stage foundation pit excavation during the staged construction process, this paper took the Optical Valley line network control center project of the east section of Wuhan rail transit line 11 as an example. Through the method of combining on site monitoring and the use of Plaxis3D numerical simulation, the ground settlement, pile top settlement, pile top horizontal displacement, pile horizontal displacement and building settlement were monitored and simulated. Finally, the monitoring results were compared with the simulation results. Analysis of the re-

sults is aimed to study the deformation characteristics of the foundation pit during the construction of the second stage foundation pit. With the increase of the excavation depth of the foundation pit, the deformation of the maintenance structure shows two different trends of uplift and settlement. When the excavation of the foundation pit reaches the deepest depth, the surface settlement and the displacement of the retaining structure reach the maximum, and finally stabilize with the improvement of the main structure of the foundation pit. During the construction of the second phase of the foundation pit, the largest deformation of the foundation pit is located at the common part of the first and second phases of the supporting structure. In the horizontal direction, it decreases from the central position of the common part of the supporting structure to both ends, and the vertical direction of the deformation from the center of the supporting structure to the bottom of the foundation pit decreases gradually, indicating that the characteristics of small changes in the middle and two ends. The numerical simulation results are consistent with the changes in the field monitoring results. The gap between the calculated data and the monitoring data is small, which provides a scientific basis for the rational design and safe construction of foundation pit projects.

**Keywords:** phased construction; excavation; second stage excavation; deformation monitoring; numerical simulation

[责任编辑：裴 琴]

(上接第 39 页)

## Unbalanced Text Classification Based on Smooth Sampling and Improved Loss

LIANG Jianli, SHANG Hao

(School of Science, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** When data are imbalanced, text classification models are easy to misclassify minority class to majority class. This paper proposes a smooth sampling method at the sampling level, and improves the cross entropy loss and label smoothing based on the imbalanced distribution at the loss function level. Experiments on the Fudan text corpus show that the improved method in each level outperforms the benchmark method. With the combination of the improved method in sampling level and loss function level, the TextCNN, BiLSTM+Attention, TextRCNN and HAN models can obtain 4.17%, 5.31%, 5.06%, and 6.21% macro  $F_1$  improvement and increase 6.56%, 3.03%, 3.92%, and 5.32% on G mean respectively. The methods proposed in this paper have been verified the effectiveness on imbalanced corpora.

**Keywords:** text classification; unbalanced percent; sampling; loss function

[责任编辑：张 众]