

DOI: 10.7672/sgjs2026040049

基于单元追踪法的基坑围护结构变形研究*

刘健美¹,李牧羽¹,王艳红¹,阮艳妹¹,刘文占^{2,3},周东波²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司,广东 广州 510010;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055;

3. 中国建筑第二工程局有限公司华中公司,湖北 武汉 430056)

[摘要] 依托广州铁路枢纽新建广州白云站(棠溪站)工程(BYZSG1标段)地铁预留工程,提出在ABAQUS有限元软件中采用单元追踪法及生死单元法进行基坑开挖模拟,分析基坑开挖过程中围护结构的水平位移,并与现场监测数据进行对比分析。结果表明,单元追踪法结合生死单元法用于ABAQUS有限元软件模拟基坑开挖可行,模拟结果与实测结果具有一致性。围护结构实测最大水平位移为10.64mm,数值模拟分析最大水平位移为7.84mm,偏差在26%左右,基坑开挖对围护结构水平位移最大影响位置为3/4基坑开挖深度处。

[关键词] 基坑;单元追踪;数值模拟;变形;监测

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0049-07

Research on Deformation of Foundation Excavation Retaining Structure Based on Element Tracking Method

LIU Jianmei¹, LI Muyu¹, WANG Yanhong¹, RUAN Yanmei¹, LIU Wenzhan^{2,3}, ZHOU Dongbo²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

3. Central China Branch, China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: Relying on the subway reservation project for the new Guangzhou Baiyun Station (Tangxi Station) project (BYZSG1 section) at the Guangzhou railway hub, this paper proposes to use the element tracking method and the birth and death element method in the ABAQUS finite element software to simulate foundation excavation. The horizontal displacement of the retaining structure during foundation excavation is analyzed and compared with on-site monitoring data. The results show that the combination of the element tracking method and the birth and death element method in the ABAQUS finite element software for simulating foundation excavation is feasible, and the simulation results are consistent with the measured results. The measured maximum horizontal displacement of the retaining structure is 10.64mm, while the maximum horizontal displacement obtained from simulation analysis is 7.84mm, with a deviation of about 26%. The maximum impact of foundation excavation on the horizontal displacement of the retaining structure occurs at 3/4 of the foundation excavation depth.

Keywords: foundation excavation; element tracking; simulation; deformation; monitoring

0 引言

随着我国城市化建设的高速发展,城市规模不断扩大,空间拥挤、交通阻塞等问题逐渐涌现,城市向地下发展已成为趋势^[1]。地铁作为地下交通工

具,其主要施工方法可分为明挖法和盖挖法两大类^[2]。相比明挖法,盖挖法更适合城市交通繁忙地段^[3-4],但易对周边环境造成影响。因此,对于土体及支护结构的变形,如果监测和控制不及时,极易引发安全事故^[5]。数值模拟法可以很好地分析基坑开挖过程中围护结构的变形规律,已被广泛应用于围护结构变形问题的研究。利用有限元模拟不仅可以分析计算围护结构水平及竖向变形^[6],讨论

* 国家自然科学基金(52178302);住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-044)

[作者简介] 刘健美,正高级工程师,副院长, E-mail: liujianmei@dtsjy.com

[收稿日期] 2025-09-15

不同土体参数对基坑围护结构变形的影响^[7],还可计算邻近建筑物由于基坑开挖产生的附加变形及周边土体变形^[8],并可据此建立相关基坑变形预测模型^[9]。但由于每个地铁基坑所面临的地层结构、周边环境均不一样,无法进行简单套用。因此,探索地铁基坑的围护结构在开挖过程中的变形特征仍具有较大意义。但继 1974 年首次应用接触面单元来模拟土体与围护墙之间的接触作用并对挡土墙进行了有限元分析之后^[10],大部分关于基坑开挖过程的模拟都采用生死单元(model change)进行,即通过杀死(remove)部分土体单元的方法来描述土方开挖^[11]。用该方法进行数值模拟可以准确描述土体与围护结构的接触关系,但由于 ABAQUS 中不提供接触对部分被移除的功能,接触面只能全部移除或激活,所以要想实现分步开挖就必须对每步开挖的土体与围护结构的接触面定义多对接触,增加了计算时间,且被动侧单元被移除后,与土体的接触面仍然存在,易导致计算不收敛^[12],常用于隧道数值模拟中的单元追踪法可以避免这一问题。

本研究以广州铁路枢纽新建广州白云站(棠溪站)工程(BYZSG1 标段)地铁预留工程为例,结合 ABAQUS 有限元软件对该车站基坑施工过程进行数值模拟,运用单元追踪法并结合生死单元预测基坑围护结构在开挖过程中的变形,将预测结果和实际监测值进行对比,确保基坑施工的安全可靠。

1 单元追踪法原理

以 ABAQUS 有限元软件为例进行说明,对基坑开挖进行二维平面应变数值分析模拟,但该方法在所有通用有限元程序中均适用,分析采用单元追踪(elcopy)法结合生死单元法(model change)对基坑围护结构及土体开挖的影响,研究思路如图 1 所示。

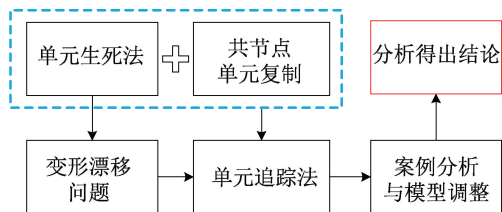


图 1 单元追踪法分析逻辑

Fig. 1 Analytical framework of the element-tracking method

应用于基坑开挖仿真的生死单元法存在如下缺点。

1) 模拟精度低,无法考虑组件的现有变形。常用的生死单元法通过将某些单元设置为非活动状

态(或称“死亡”状态),然后根据施工进度逐步激活这些单元,以模拟土壤开挖与混凝土浇筑的过程。然而,该方法未能考虑已有构筑物的变形。激活的单元保持在其初始位置,导致在施工过程中结构组件之间的相互作用和累积效应未被准确反映,从而引发不准确的模拟结果,这也通常被称为单元漂移问题。

2) 单元本构类型改变困难。在地下结构施工的数值模拟过程中,通常会出现挖掘土壤并添加结构的情况。在这种情况下,改变单元的材料参数(如从土壤材料属性转变为混凝土材料属性)是常见的模拟方法。然而,这种方法无法改变材料本身的本构模型(如土壤需要莫尔-库仑模型,而混凝土需要损伤弹塑性模型),因此存在显著的局限性。下面为生死单元法的问题分析以及单元追踪法的原理与实施步骤。

1.1 生死单元法

有限元软件中结构的添加和移除可以通过激活和“杀死”相关单元来描述。当“杀死”单元时,有限元软件将被杀死单元的刚度乘以 1 个非常小的数值,并从总质量矩阵中消除被杀死单元的质量^[13],还将无效荷载(如压力、热流和热应变)设定为 0,从而有效“杀死”该单元。

在运用生死单元法模拟分析的过程中,选择被挖掉的土体单元并将其“杀死”,即可模拟土体开挖过程。但在删除或重新激活元素并共享已求解部分的边界条件和荷载情况下,由于模型变化可能会导致计算的不连续性,从而引起单元漂移,即当某些单元被“杀死”(刚度、质量等特性被设为非常小或 0)时,它们并没有完全从模型中移除,而是继续在结构上存在并与其他“活”单元协调变形,影响对结构行为的准确描述,如图 2 所示。

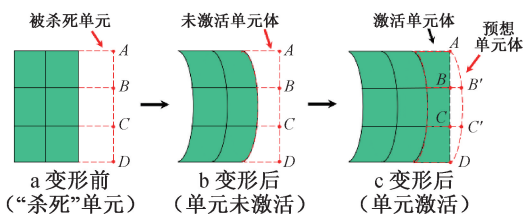


图 2 生死单元法

Fig. 2 Birth and death element method

1.2 单元追踪法

单元追踪法是通过 elcopy 命令在模型原有节点处重新复制 1 个相同的单元,再对复制单元重新赋予材料属性。在初始分析步可将这些复制单元“杀死”,直至围护结构施工时,再重新激活这些单元^[14],因此模型属于整体建立,模型间无接触设置,

计算具有更好的收敛性。此外,由于 elcopy 命令复制单元集合时会重新生成节点、接触和边界条件,确保新单元集合与原有的单元集合在几何和拓扑结构上保持一致,让新单元集合与原有的分析模型保持一致,如图 3 所示。

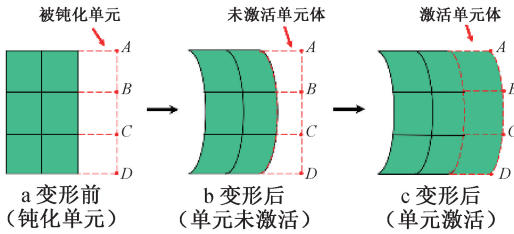


图 3 单元追踪法

Fig. 3 Element tracking method

在 ABAQUS 使用手册中,关于 elcopy 的使用方法是 在 inp 文件中 Part 模块的结尾处编辑关键字以模拟基坑开挖过程为例,其步骤如图 4 所示。

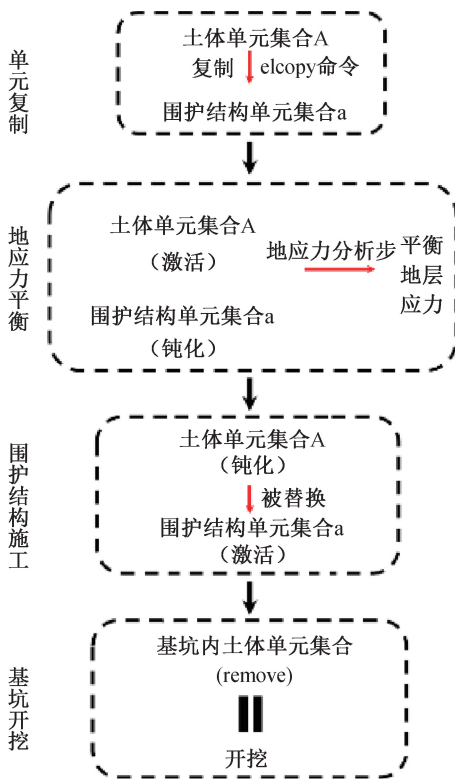


图 4 单元追踪法建立基坑开挖模型流程

Fig. 4 Workflow for building a foundation excavation excavation model using the element tracking method

1) 单元复制

在基坑围护结构施工位置复制 1 套单元作为围护结构,语法如下:

```
* elcopy, oldset = name, newset = New_name,
element shift = number, shift nodes = number
* elset, elset = New_name
```

其中,oldset 为要复制的单元集合,newset 为复制后的单元集合,element shift 为复制后单元起始编号,shift nodes 缺省值为 0。

地下连续墙单元的复制关键字如下:

```
* elcopy, oldset = dlq, newset = New_dlq, element
shift = 200 000, shift nodes = 0
* elset, elset = New_dlq
```

该语法表示,旧的单元集名称为 dlq,新复制的单元集名称为 new_dlq,复制单元的起始编号为 200 000。

2) 地应力平衡

在此阶段,将复制的围护结构单元进行钝化,激活同一位置的土体单元并通过地应力平衡分析步考虑土层地应力,对土体进行地应力平衡。

3) 围护结构施工

通过激活围护结构单元,钝化同一位置的土体单元,完成土体单元与基坑围护结构单元的替换,以此来模拟围护结构施工。

4) 基坑开挖

围护结构施工完成后,通过生死单元法“杀死”基坑内第 1 层土体单元集合,模拟基坑内第 1 层土体开挖。

2 工程案例

2.1 工程概况

广州铁路枢纽新建广州白云站(棠溪站)工程(BYZSG1 标段)地铁预留工程位于京广铁路下方,沿东西向设置,西至国铁红线、东至 12 号线侧墙;基坑长约 350m,标准段宽度 45.9m,基坑深约 11.4m。

车站为双岛四线地下岛式站台车站,站台东西端部分别与 12、24 和 22 号线实现 T 字换乘;车站结构为现浇混凝土结构(局部采用型钢组合结构),顶、中底板与中柱、内衬墙形成闭合框架,顶、中、底板设计为梁板体系;围护结构与车站主体结构采用复合式结构(见图 5)。

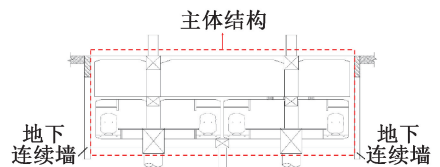


图 5 车站结构

Fig. 5 Station structure

2.2 基坑概况

基坑采用放坡+地下连续墙+内支撑体系,主体围护结构均采用 1 000mm 厚地下连续墙加横向 1 道内支撑方案。基坑 2-18 轴~2-19 轴+14.5m 范围

内采用明挖顺作法施工,2-19 轴+14.5m~2-25 轴范围内采用盖挖顺作法施工。根据地质勘探结果,2-19 轴+14.5m~2-25 轴范围内主要地层分布及其物理力学参数如表 1 所示。

表 1 主要地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of strata

土层名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
①杂填土	18.7	12.00	8.00
②淤泥	15.9	8.45	4.03
③粉质黏土	18.9	23.49	11.27
④全风化炭质页岩	18.7	35.51	20.88

2.3 开挖工况

开挖工况如下:①第 1 步进行放坡开挖,挖至-5.500m;②第 2 步,围护结构施工,完成地下连续墙、立柱桩施工;③第 3 步施工地下连续墙冠梁及第 1 道内支撑;④第 4 步,冠梁及内支撑施工结束后进行土方开挖,先挖至-11.500m 深度,进行监测数据分析;⑤再次开挖至基坑底部-16.50m;⑥浇筑结构底板。

2.4 基坑数值模型建立

使用 ABAQUS 有限元分析软件对基坑开挖进行二维平面应变数值模拟分析,采用单元追踪法结合生死单元法对基坑围护结构及土体开挖进行建模分析。周围土体影响区域取基坑深度的 5 倍左右,整个模型尺寸为 92m×72m(长×宽)。根据地质勘察报告,地下连续墙施工深度范围内地层均为全风化炭质页岩。选用莫尔-库仑本构模型,地下连续墙和混凝土支撑用 beam 单元进行模拟,采用 C30 混凝土(弹性模量、泊松比、重度分别取 30GPa, 0.167, 24kN/m³)。基坑有限元模型如图 6 所示,网格划分如图 7 所示。

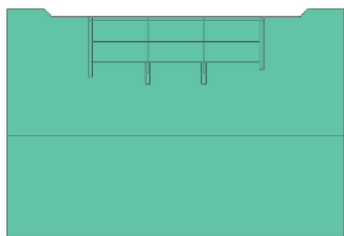


图 6 基坑有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the foundation excavation

运用单元追踪法进行基坑开挖模拟,其难点在于结构构形不断变化,当单元复出且改性时,其结构构形应该与之相协调,即应满足应变协调关系。因此,在本次模拟过程中的地应力平衡分析步中,钝化所有的复制单元(围护结构单元)及梁单元(支

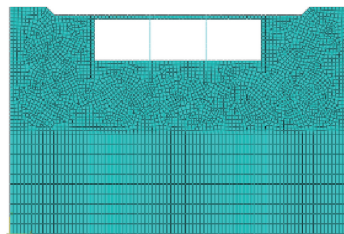


图 7 网格划分

Fig. 7 Finite element mesh

撑),使所有土体处于激活状态,进行地应力平衡。在围护结构施工分析步中,钝化围护结构所在材料属性为土体的单元,激活复制单元(围护结构单元),形成基坑围护,随后进入开挖分析步,对开挖土体单元利用生死单元钝化,模拟土体开挖。用此方法对该基坑进行模拟可以减少单元间的接触,有效节约计算时间,地应力平衡云图如图 8 所示,此时围护结构单位处于钝化状态。按此方法建模,可以保证建模精准性的同时减少接触单元的建立,减少计算时间。

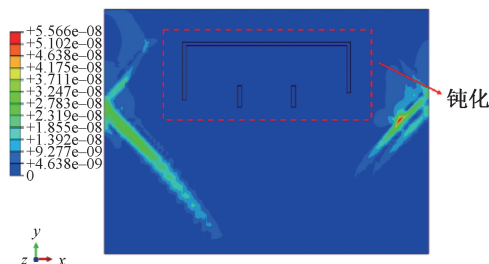


图 8 地应力平衡云图(单位:m)

Fig. 8 Cloud map of in-situ stress equilibrium(unit: m)

3 监测点布置

围护结构设置墙顶水平位移及竖向位移作为监测项目,共布置 51 个测点。根据有关规范和基坑开挖深度、周边环境等情况,基坑安全等级按一级考虑,根据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》设立各监测项目报警值,如表 2 所示。

表 2 监测报警值

Table 2 Monitoring alarm thresholds

序号	监测对象	变化速率/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	累计值/ mm
1	墙顶水平位移	3	30
2	墙顶竖向位移	3	20

各监测项目测点布置如图 9 所示,选择 2-22 轴附近断面作为监测断面 JC,断面分别穿过监测点 LS-8 和 LS-15。

4 围护结构监测结果分析

4.1 墙顶水平位移

墙顶累计水平位移时间曲线如图 10 所示。由

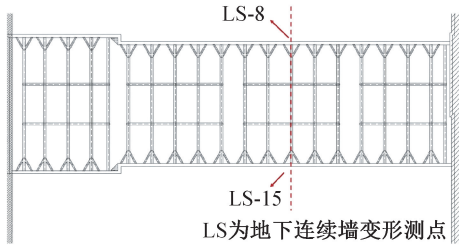


图9 监测点布置

Fig. 9 Layout of monitoring points

图 10 可知,地下连续墙墙顶水平位移先水平发展后迅速增大,最后趋于稳定值。这是因为基坑土体在开挖卸荷的过程中会使得围护结构受到内外压力,从而产生水平位移,使基坑内围护结构水平位移明显增大,且增大趋势一直持续到土方开挖结束。当基坑开挖结束后,底板浇筑也随之结束,对此水平位移变化会逐渐减弱,最终趋于稳定。开挖期间,监测点均向基坑内发生位移,但所选取监测断面上测点累计水平位移均未超过 30mm,最大值为 10.64mm。因此可以判断,基坑内监测点墙顶累计水平位移均未达到报警值,属于正常范围。

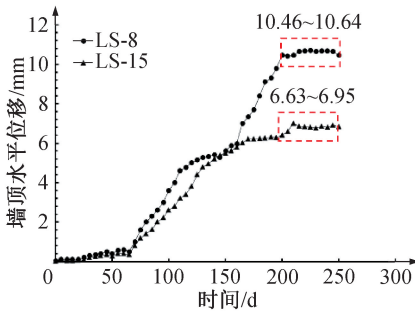


图 10 墙顶累计水平位移-时间曲线

Fig. 10 Time history of cumulative horizontal displacement at the wall top

4.2 墙顶竖向位移

墙顶竖向位-时间曲线如图 11 所示,随着基坑开挖,各监测点的墙顶竖向位移均表现为先增大后减小,之后趋于稳定值。在 100~150d,曲线出现转折,沉降逐渐减小,产生原因可能有两点:①基坑开挖到底,底板浇筑结束后,结构整体趋于稳定,竖向变形变化程度减弱;②基坑开挖完成后,基底土会产生回弹变形,同样使竖向变形程度减弱。在 120d 左右,测点 LS-15 监测曲线出现凸起,这可能是由于基坑周边土体在开挖过程中受重力影响出现隆起导致墙顶竖向位移发生回弹^[15-17]。整个开挖期间,监测断面上测点的累计竖向位移最大值为 5.02mm,并未超过 20mm 报警值,属于正常范围。

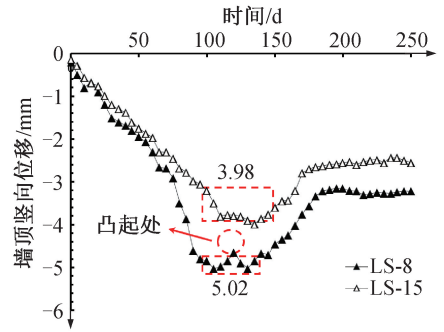


图 11 墙顶累计竖向位移-时间曲线

Fig. 11 Time history of cumulative vertical displacement at the wall top

5 数值模拟与现场监测数据对比

选取工况 5 对墙顶累计水平位移进行分析,并根据所选取监测断面将模拟监测数据分为左侧地下连续墙(编号为 ZD)及右侧地下连续墙(编号为 YD),基坑墙顶累计水平位移监测值和模拟值如图 12,13 所示。

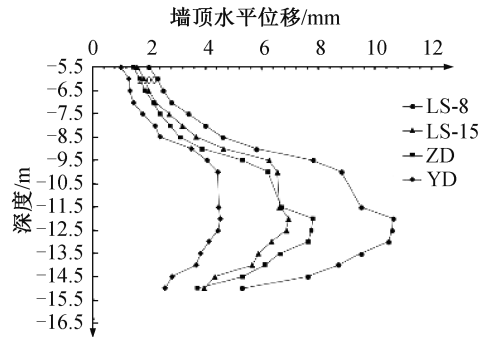


图 12 基坑墙顶累计水平位移监测

Fig. 12 Monitoring of cumulative horizontal displacement at the foundation excavation wall top

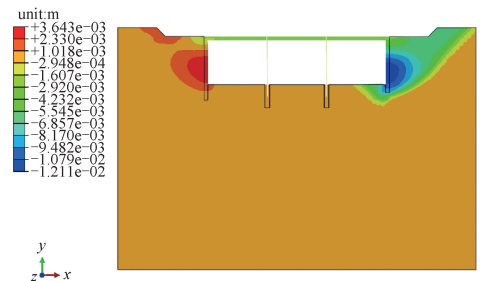


图 13 墙顶水平位移数值模拟分析云图(单位:m)

Fig. 13 Cloud map of numerically simulated horizontal displacement at the wall top(unit: m)

由图 12 可知,开挖深度在 5m 范围时,围护结构墙顶水平位移基本在 2~4mm,此时整体位移较小。开挖深度在 5~12m 时,围护结构墙顶水平位移逐渐增大,最大值出现在 LS-8 测点处,为 10.64mm。开挖深度超过 12m 后,随着开挖深度的增加,围护

结构墙顶水平位移逐渐减小,分析认为这是由于基坑底部土体受到破坏较小且地下连续墙的嵌固作用控制基坑底部的变形发展^[18]。监测数据与数值模拟分析数据具有较高的一致性,围护结构墙顶累计水平位移曲线在该工况下均呈“弓”字形发展,此类情况常见于围护结构内支撑体系且第 1 道支撑为混凝土支撑的围护结构^[19],与本工程情况接近,说明本工程数值模型建立较贴近工程实际,但数值模拟分析值较实际监测值整体偏小。实际监测中水平位移最大值为 10.64mm,数值模拟分析中水平位移最大值为 7.88mm,偏差为 26%左右,与施工荷载、车辆荷载、地下水等有关^[20]。

6 结语

1)数值模拟与实际监测结果均显示围护结构变形趋势一致,表明结合单元追踪法的有限元分析在基坑开挖的二维有限元模拟中能够有效评估围护结构的安全性。数值模拟的分析值普遍略低于实际监测值,偏差约为 26%,这一误差主要归因于模拟中未考虑施工荷载、车辆荷载以及地下水等因素。尽管这一偏差在计算结果中具有一定的保守性,但同时也提示了模型改进的可能方向。

2)对于墙顶水平位移,其最大值通常出现在最大开挖深度的 3/4 处,并呈现拱形分布。这种模式可能是由于坑底土体破坏较小,并且地下连续墙嵌入部分的约束作用抑制了变形的发展。墙顶竖向位移表现为先增加、后减少并最终趋于稳定,这反映了底板浇筑完成后总体结构逐渐稳定,进而导致竖向变形减少。基坑开挖后基础土体的回弹可能进一步促使竖向变形减小。

3)某些位移曲线中出现的凸起现象可归因于开挖过程中基坑周围中部土体在自身质量下向上隆起,导致沉降突然减少。

单元追踪法在模拟复杂开挖过程中具有良好的实用性。后续解决如何将地下水效应、动态荷载等其他因素纳入模型中可以进一步提高模拟的精度。此外,将这一方法扩展至三维模拟应用领域,将有助于更全面地理解复杂开挖工程中的变形特性。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):112-113.
QIAN Q H. Meet the climax of urban underground space development in China [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1998, 20(1): 112-113.
- [2] 王梦恕. 21 世纪我国隧道及地下空间发展的探讨[J]. 铁道科学与工程学报,2004,1(1):7-9.

WANG M S. Development of tunnel and underground space in 21th century in China [J]. Journal of railway science and engineering, 2004, 1(1): 7-9.

- [3] 谢仁德. 盖挖法和明挖法施工技术及优缺点比较[J]. 地铁与轻轨,1992,5(4):22-24.
XIE R D. Comparison of construction technology, advantages and disadvantages between cover excavation method and cut and cover [J]. Urban rapid rail transit, 1992, 5(4): 22-24.
- [4] 唐传政,彭晓秋,熊秋梅,等. 武汉地铁 3 号线一期工程车站基坑施工风险控制分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):415-418.
TANG C Z, PENG X Q, XIONG Q M, et al. Control and analysis of construction risk in excavations of stations of project stage No. 1 of Metro Line 3 in Wuhan [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 415-418.
- [5] 陈开宇,袁金兴,张焯,等. 基于 ABAQUS 软件对苏州某大型基坑监测的模拟与分析[J]. 土工基础,2023,37(3):343-348.
CHEN K Y, YUAN J X, ZHANG Y, et al. Numerical analysis of a large-scale deep excavation in Suzhou using ABAQUS software and construction monitoring[J]. Soil engineering and foundation, 2023, 37(3): 343-348.
- [6] 齐朋,张宇奇,王宁. 深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析[J]. 中外公路,2022,42(1):38-42.
QI P, ZHANG Y Q, WANG N. Lateral displacement monitoring and numerical simulation analysis for retaining system of deep foundation excavation [J]. Journal of China & foreign highway, 2022, 42(1): 38-42.
- [7] 古少枫,潘卫东. 大型深基坑明挖顺作产生的地面沉降研究[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(S1):1683-1688,1714.
GU S F, PAN W D. The surface settlement of large-scale and deep foundation excavations excavation by the bottom-up method [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2014, 10(S1): 1683-1688, 1714.
- [8] 李进军,王卫东,邸国恩,等. 基坑工程对邻近建筑物附加变形影响的分析[J]. 岩土力学,2007,28(S1):623-629.
LI J J, WANG W D, DI G E, et al. Analysis of the influence of excavation engineering on additional deformation of adjacent buildings [J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(S1): 623-629.
- [9] 高文华,杨林德,沈蒲生. 基坑变形预测与周围环境保护[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(4):555-560.
GAO W H, YANG L D, SHEN P S. Deformation forecast for foundation excavation and environmental protection around pit [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2001, 20(4): 555-560.
- [10] CLOUGH G W, HANSEN L A. Clay anisotropy and braced wall behavior [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1981, 107(7): 893-913.
- [11] 胡长明,袁一力,梅源,等. 基于 ABAQUS 的地层-结构法模型的地应力平衡方法研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(4):76-86.
HU C M, YUAN Y L, MEI Y, et al. Initial geo-stress balance method for the finite-element model using the stratum-structure

- method[J]. *Modern tunnelling technology*, 2018, 55(4):76-86.
- [12] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
- XU Z H. Study on deformation behavior of deep foundation excavation combined with supporting structure and main underground structure in Shanghai area[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [13] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 1998.
- ZHU B F. The finite element method theory and applications[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1998.
- [14] 张云. 浅埋暗挖大跨地铁车站施工技术[J]. *隧道建设*, 2005, 25(2):28-30, 43.
- ZHANG Y. Construction technology of shallow buried and underground excavation of long-span subway station[J]. *Tunnel construction*, 2005, 25(2):28-30, 43.
- [15] 曾家培. 地铁车站深基坑工程对周边环境变形影响数值模拟研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
- ZENG J P. Numerical simulation study on the influence of deep foundation excavation engineering of subway station on surrounding environment deformation[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [16] 吉香宇. 青岛地铁清江路站浅埋暗挖施工的数值模拟与分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2013.
- JI X Y. Numerical simulation and analysis of shallow buried excavation construction in qingjiang road station of Qingdao Metro[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013.
- [17] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- FEI K, ZHANG J W. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [18] 刘厚成, 郭启军. 基于ABAQUS的地铁深基坑变形监测与数值分析研究[J]. *土工基础*, 2021, 35(1):72-75.
- LIU H C, GUO Q J. Deformation monitoring and numerical analysis of metro deep excavation using ABAQUS[J]. *Soil engineering and foundation*, 2021, 35(1):72-75.
- [19] 刘伟楠. 合肥某地铁车站半盖挖深基坑变形规律研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- LIU W N. Study on deformation law of semi-covered deep foundation excavation in a subway station in Hefei[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [20] 朱虹牧, 徐金明, 王俊, 等. 基坑开挖对围护结构变形的影响[J]. *桂林理工大学学报*, 2017, 37(3):508-513.
- ZHU H M, XU J M, WANG J, et al. Numerical simulation of excavation deformation in retaining structures[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(3):508-513.

(上接第 19 页)

- [6] 索伦, 彭鹏, 田波. 再生混凝土工作性与抗压强度试验研究[J]. *土木工程与管理学报*, 2014, 31(3):39-42, 46.
- SUO L, PENG P, TIAN B. Research on workability and compressive strength of recycled concrete[J]. *Journal of civil engineering and management*, 2014, 31(3):39-42, 46.
- [7] 周万良, 邓欢. 基于 NaOH 激发矿渣和硅酸盐水泥的功能梯度混凝土的抗氯离子渗透性能[J]. *材料导报*, 2022, 36(S1):300-303.
- ZHOU W L, DENG H. Chloride penetration resistance of functionally graded concrete based on NaOH activated slag and Portland cement[J]. *Materials reports*, 2022, 36(S1):300-303.
- [8] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(3):74-84.
- HUANG H, GUO M X, ZHANG W, et al. Mechanical property and microstructure of geopolymer concrete based on fly ash and slag[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(3):74-84.
- [9] 陈东林, 王学志, 刘华新. 基于灰色关联分析的 RTSF-PVA 混杂纤维矿渣混凝土的力学性能分析及优化[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(12):54-61.
- CHEN D L, WANG X Z, LIU H X. Analysis and optimization of mechanical properties of RTSF-PVA hybrid fiber concrete based on grey correlation analysis[J]. *Composites science and engineering*, 2022(12):54-61.
- [10] 兰素恋, 田威, 张红日, 等. 基于熵权法和灰色理论的钢渣粗骨料混凝土耐久性评估及寿命预测[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(10):3710-3721.
- LAN S L, TIAN W, ZHANG H R, et al. Durability evaluation and life prediction of steel slag coarse aggregate concrete based on entropy weight method and grey theory[J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2023, 42(10):3710-3721.