

余炜, 高品红, 陈刚, 等. 深基坑开挖对周边环境影响范围的数值模拟研究[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 145–153. [YU Wei, GAO Pinhong, CHEN Gang. Numerical Simulation Study on Influence Range of Deep Foundation Pit Excavation on Surrounding Environment [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 145–153]

深基坑开挖对周边环境影响范围的数值模拟研究

余 炜, 高品红, 陈 刚

(浙江华东建设工程有限公司, 杭州 310012)

摘要: 为研究深基坑开挖对周边环境的影响范围, 以泉港地下储粮库项目工程为背景, 利用三维岩土工程有限公司软件 PLAXIS^{3D} 进行数值模拟, 对比了摩尔-库仑(M-C)本构模型和高级硬化本构模型(HS本构模型)对模型沉降变形的影响。同时计算了逐级开挖基坑变形影响范围以及监控点的沉降和水平位移曲线。研究结果表明: 从位移量值来看, 基坑开挖引起的水平变形远大于沉降变形, 水平变形与沉降变形的比值, 约为 4 : 1; 基坑开挖过程中降排水引起的地表沉降变形影响范围较大, 但量值较小; 而土体开挖引起的变形较大, 但变形影响范围有限, 仅限于基坑周边一定距离; 采用 M-C 本构模型与 HS 本构模型, 得到的变形规律基本一致。

关键词: 深基坑开挖; 有限元模拟; 本构模型; 沉降监测

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0145-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.17

Numerical Simulation Study on Influence Range of Deep Foundation Pit Excavation on Surrounding Environment

YU Wei, GAO Pinhong, CHEN Gang

(Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to study the influence range of deep foundation pit excavation on the surrounding environment, taking the Quangang Underground Grain Storage Project as the background, the three-dimensional geotechnical finite element software PLAXIS^{3D} was used for numerical simulation, and the influence of the Moore-Coulomb (M-C) constitutive model and the advanced hardening constitutive model (HS constitutive model) on the settlement and deformation of the model was compared. At the same time, the influence range of foundation pit deformation by the progressive excavation and the settlement and horizontal displacement curves of the monitoring points are calculated. The results show that: From the displacement value, the horizontal deformation caused by foundation pit excavation is much greater than the settlement deformation, and the ratio of horizontal deformation to settlement deformation is about 4 : 1; during the foundation pit excavation, the influence range of surface settlement deformation caused by dewatering and drainage is large, but the value is small; the deformation caused by soil excavation is relatively large, but the influence range of deformation is limited, which is only limited to a certain

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678352)

作者简介: 余炜(1986-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计及研究工作。

E-mail: yu_w3@hdec.com

distance around the foundation pit; the deformation laws obtained by using M-C constitutive model and HS constitutive model are basically consistent.

Keywords: Deep foundation pit excavation; Finite element simulation; Constitutive model; Settlement monitoring

0 引言

随着城市地上空间资源的日益趋紧,地下空间利用的概念应运而生,自90年代以来,我国建成的一大批大型地下工程,如广蓄、太平驿、大朝山等^[1-2]。虽然地下空间的利用产生了巨大的经济效益,但深-坑的开挖难免会扰动土体原始结构和应力分布,从而打破土体的平衡状态,对相邻建筑物造成了不利的影响^[3-4],危及人民群众的生命与财产安全。

数值模拟是研究基坑沉降的重要手段^[5-6],对于本构模型的选取:徐中华等^[7]通过算例系统地对比了各类模型在基坑开挖数值分析中的适用性,结果表明在基坑开挖的数值分析中更适用硬化类弹性模型。葛鹏等^[8]结合镇江某深基坑工程,使用有限元分析软件 Midas GTS NX 对比分析了常用土体本构模型在基坑开挖数值模拟中的适用性。对于基坑沉降监测:Zhao等^[9]采用GPS监测和数值模拟的综合分析方法,计算得到了地面沉降引起的相应临界水平应变和角变形,Rehman等^[10]采用频率比、统计指数和Mamdani模糊模型来评估这些参数对煤矿沉陷敏感性的有效性,研究结果表明Mamdani模糊模型具有最高的成功率(87%)和预测精度(85%)。胡海英等^[11]、左殿军等^[12]均通过数值计算分析了地铁基坑开挖对周边地面沉降的影响。对于流固耦合问题:郭秋^[13]通过ABAQUS建立花岗岩均质计算模型,开展了考虑花岗岩非均质性的流固耦合破坏过程模拟研究。李博识^[14]基于流固耦合的盾构隧道施工对地下管线变形影响的数值模拟,研究了初始水位高度、盾构隧道开挖深度、盾构隧道埋深以及管径等因素对地下管线变形的影响,研究结果对地下管线的盾构隧道施工安全具有一定的意义。

综上,本文以泉港地下储粮库项目工程为背景,利用三维岩土工程有限元软件PLAXIS^{3D}进行数值模拟,对比了摩尔-库仑(M-C)本构模型和高级硬化本构模型(HS本构模型)对模型沉降变形的影响。同时计算了逐级开挖基坑变形影响范围以及监控点的沉降和水平合位移曲线,为相关工程

的设计和施工提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

拟建泉港地下储粮库项目位于泉港炼化石油工业园区的外部安全距离线与园区用地界线之间,项目主要包括地下储粮库、地面储运设施以及配套的辅助生产、办公和公用工程设施。

依据现有规划方案,拟在泉港安控区350505-01-AK-01(以下简称01地块)地块范围内,开发修建地下储粮库。拟建设的地下储粮库占地面积约100 000平方米,开挖深度约为100 m。本项目初步考虑采用露天大开挖方式,石料采用切割方式开挖。

因项目占地面积广、开挖深度超相关规范要求,开挖岩体存在较高水平地应力,故01地块储粮库开挖可能会对周边环境造成一定的不利影响。为此,本次工作主要考虑依据现有可研阶段地勘及建设方案等资料,采用三维有限元数值分析方法,研究评估地下储粮库筒仓开挖对周边环境的影响范围。

1.2 地质条件

根据场地工程地质测绘及钻探取芯鉴别,结合原位测试和室内土工试验成果综合分析,在钻探控制深度范围内分布的地层共划分为4大层,6个亚层,自上而下分述如下:覆盖层人工杂填土、淤泥质黏土、残坡积(含砾)黏质粉土(砂)、燕山期侵入岩花岗闪长岩、花岗斑岩及基性后期侵入岩脉辉绿岩脉。

1.3 水文地质条件

场区水系不发育,地表水主要为塘、沟、小水库及小河流内水,其水位受大气降水影响明显。根据本次勘察过程中的水文地质调查成果,根据含水层性质及地下水埋藏条件,地下水可分为孔隙潜水和基岩裂隙潜水,地下水一般埋深为1~15 m,局部>20 m。孔隙潜水含水组水位埋深0.20~



图1 场地现状实景图

Fig.1 Real view of the current status of the site

2.30 m之间,主要赋存于表部填土层及上部土层中。孔隙承压水主要赋存于圆砾层中,分布于勘察区下部。基岩裂隙水主要赋存于基岩的风化裂隙中,含水性及透水性差,含水不均匀,无统一地下水位,根据本区域建筑施工经验,基岩裂隙水对本工程影响小。

2 模型建立与验证

2.1 计算模型与模拟步骤

利用三维岩土工程有限元软件 PLAXIS^{3D} 进行数值模拟。其模拟工况如下表1所示。

表1 模拟工况		
Table 1 Simulated conditions		
工况	施工步骤	工况描述
工况0	初始地应力平衡	生成初始竖向及水平地应力
工况1	逐级开挖	分7层逐级开挖

2.1.1 模型范围

建模范围平面为5~10倍用地红线平面范围,竖向为5倍开挖深度(开挖深度暂按100 m考虑)。根据上述建模范围原则,确定了整体有限元建模范围为平面6000 m×6000 m,深度为500 m,水平坐标X轴与Y轴周边法向约束,底面固定约束,坐标系原点位于两个坑之间中点。

2.1.2 地层分层

参考01地块附近六个钻孔(ZK28-33, BK1、2、6)数据及基坑逐级开挖深度,以偏保守和便于建模为原则绘制地层。共分4个地层,由地表至地

下分别为:覆盖层(厚10.3 m),全风化层(厚10 m),强风化层(厚10 m),弱风化层(底层)。全局水位线设置于地面。

采用高精度二次四面体单元进行网格划分^[15],该二次单元有10个节点,属于高精度单元。共划分单元302 678个,节点425 339个。其整体三维有限元模型见图2所示。构造各土层初始地应力场,考虑了各级开挖过程中降排水对渗流场的影响。分7层逐级开挖。对于覆盖层与全风化层,在开挖过程中采用混凝土板支护,混凝土板厚度为30 cm。表2为逐级开挖深度。

表2 逐级开挖深度	
Table 2 Depth of step-by-step excavation	
开挖步骤	底部高程/m
0	0
1	-10.3
2	-20.3
3	-30.3
4	-40.3
5	-60.3
6	-80.3
7	-98.0

2.2 材料参数与本构模型选取

各层土摩尔—库伦(M-C)本构模型^[16]计算参数如下表3,采用流固耦合算法,先计算每级降水开挖的稳态渗流场,再计算开挖引起的基坑变形,由于为稳态渗流场,因此渗透系数可由程序按土类定名经验选取。

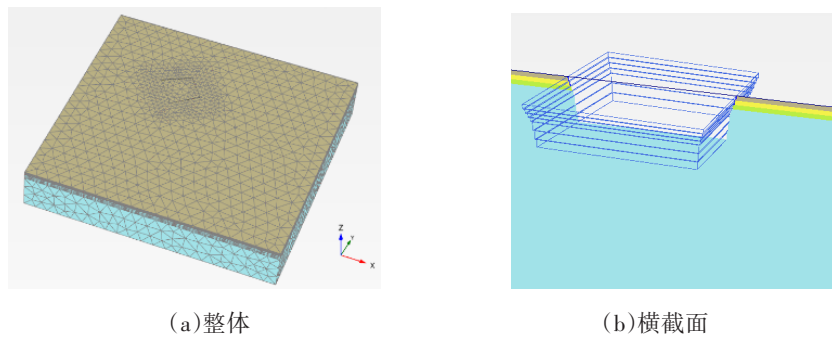


图2 三维有限元模型

Fig.2 The 3D finite element model

由于摩尔—库伦本构模型对于卸载的模拟有其局限性，因而本文采用土体高级硬化本构模型^[17] (HS本构模型)进行敏感性分析。该本构模型具有单独的卸载模量，经验取值方法见表4所示，对土体本项目统一取卸载模量为切线模量的2倍，即 $E_{ur}^{ref}=2.0E_{50}^{ref}$ ；而切线模量为1.0~1.6倍压缩模

量，即 $E_{50}^{ref}=1.0\sim1.6 E_{oed}^{ref}$ ，其中令 $E_{oed}^{ref}=E_s$ ，见表5所示HS本构模型硬化本构模型参数。

其中， E_{ur}^{ref} 是卸载和再加载时的参照杨氏模量。 E_{50}^{ref} 是在参照应力 p^{ref} (一般为100 kPa)下的参照刚度模量。

表3 M-C本构模型参数

Table 3 Parameters of M-C constitutive model

岩土体单元	弹性模量 /(MPa)	泊松比	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /(kPa)	内摩擦角 /(°)	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
覆盖层	60	0.40	19.0	20.0	20.0	0.05
全风化	100	0.35	23.5	39.0	17.4	0.05
强风化	300	0.35	23.5	60.0	30.0	0.05
弱风化	8000	0.24	25.5	700.0	38.0	非多孔

表4 HS本构模型经验参数取值方法

Table 4 Empirical parameter value method of HS constitutive model

土体名称	比例关系		
	$E_{oed}^{ref}:E_{s1-2}$	$E_{50}^{ref}:E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}:E_{50}^{ref}$
含砂黏土	0.7:1	1.6:1	3.5:1
含砂粉质黏土	0.9:1	1.6:1	4.6:1
粉土质砂	/	/	2.5:1

2.3 逐级开挖基坑周边渗流场及变形监控点布置

2.3.1 逐级开挖基坑周边渗流场

图3为逐级开挖坑周渗流场分布，可见随着逐级开挖的进行，坑壁周边100范围内地下水开始下降(图3(d)所示)，表明该基坑降排水会引起覆盖层土体的有效应力增加，进而引起土体沉降，土体沉降会进一步引起大范围土体的小幅度沉降。储粮库开挖过程中降排水引起的地表沉降变形影响范围较大，但量值较小。

表5 HS本构模型参数

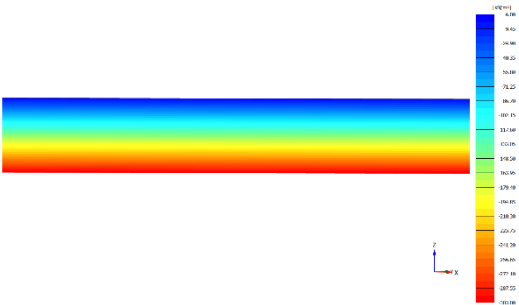
Table 5 Parameters of HS constitutive model

土类	覆盖层	全风化	强风化	弱风化
本构模型	高级硬化	高级硬化	高级硬化	M-C
c /(kPa)	20	39	60	700
φ /(°)	20	17.4	30	38

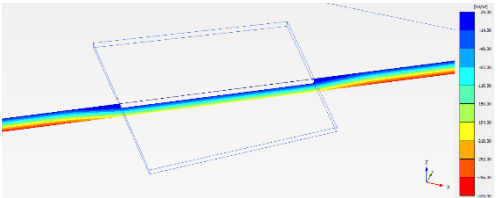
(转下表)

(接表5)

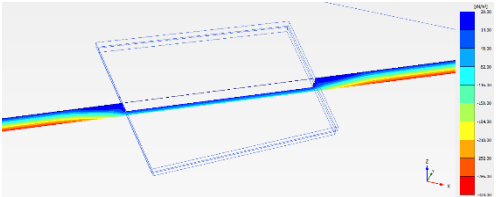
土类	覆盖层	全风化	强风化	弱风化
Rf	0.9	0.9	0.9	/
切线模量 $E_{50}^{\text{ref}}/(\text{MPa})$	60 $(1.0E_{\text{oed}}^{\text{ref}})$	100 $(1.0E_{\text{oed}}^{\text{ref}})$	300 $(1.0E_{\text{oed}}^{\text{ref}})$	/
压缩模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/(\text{MPa})$	60	100	300	8000
卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/(\text{MPa})$	120 $(2.0E_{50}^{\text{ref}})$	200 $(2.0E_{50}^{\text{ref}})$	600 $(2.0E_{50}^{\text{ref}})$	/
m	0.8	0.6	0.6	/



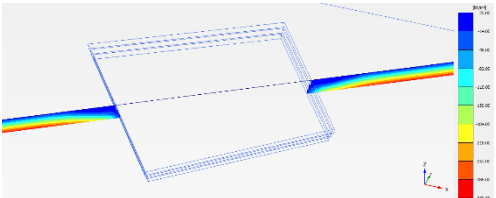
(a)初始



(b)第1级开挖



(c)第2级开挖



(d)第3级开挖

图3 逐级开挖坑周渗流场分布

Fig.3 Distribution of seepage field around excavation pit step by step

弱风化层被设置为非多孔介质，因此地下水仅覆盖于上三层共30.3 m厚的土层中。第三级基坑开挖已至底层弱风化层，因此在本次数值计算中，第

四级及此后的基坑开挖不影响坑周渗流场的分布。

2.3.2 有限元变形监控点布置

选取基坑长边的200 m距离的监控点，绘制每级开挖引起的地表沉降，监控点布置图见图4所示。

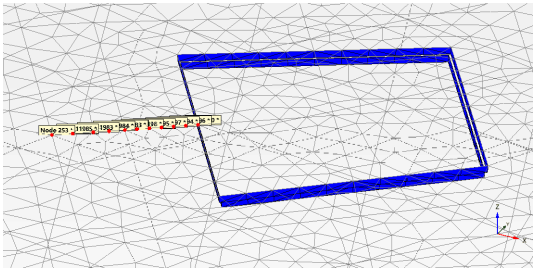


图4 储粮库位移监控点示意

Fig.4 Schematic diagram of displacement monitoring point of grain storage

3 模拟结果与分析

3.1 逐级开挖基坑变形影响范围

表6和表7分别为M-C本构模型与HS本构模型最终开挖后合位移0.5 cm、1 cm、2 cm、3 cm影响圈。可知自重应力场开挖各项位移及影响范围明显小于高地应力场，由于两种应力场降水区域完全相同，因而表明本深基坑开挖岩体地应力的释放是引起基坑周边水平变形的最主要与直接影响因素。

弱风化岩层水平实测地应力较高，从影响范围来看，地表变形曲线均在弱风化岩层开挖前后出现骤降，尤其是后四级弱风化岩层开挖引起的变形逐步增大，并在基坑周边形成沉降陡降曲线，并引起土体的水平位移。

将逐级开挖引起地表合位移沉降大于0.5 cm、

1 cm、2 cm、3 cm的范围标识出来,称为0.5 cm、1 cm、2 cm、3 cm影响圈,见图5和图6所示,两种本构模型最终开挖引起的0.5 cm、1 cm影响圈较为广泛,深基坑开挖往往需要基坑降水,随着开挖的进行,深基坑周边的地下水会逐步下降,基坑降水导致周边范围表层土体的有效应力增加,进而引起土体的沉降,但2 cm、3 cm影响圈就急剧缩小为基坑周边附近,可见单纯的开挖对周边

变形的影响有限,基坑降水加开挖是本基坑周边变形的直接因素。

土体采用M-C本构模型与HS本构模型,得到的变形规律基本一致,由于HS本构模型土体的模量随着自重应力的增加而增大,但在土体表层的模量普遍低于M-C本构模型的固定值。因而采用HS本构模型时,计算所得位移稍大于采用M-C本构模型的计算结果。

表6 M-C本构模型最终开挖合位移影响圈

Table 6 The combined displacement influence circle of the final excavation of the M-C constitutive model				
开挖工况	0.5 cm影响圈范围	1 cm影响圈范围	2 cm影响圈范围	3 cm影响圈范围
开挖至坑底	距坑壁 250 m	距坑壁 150 m	距坑壁 75 m	距坑壁 45 m

表7 HS本构模型最终开挖合位移影响圈

Table 7 The combined displacement influence circle of the final excavation of the HS constitutive model				
开挖工况	0.5 cm影响圈范围	1 cm影响圈范围	2 cm影响圈范围	3 cm影响圈范围
开挖至坑底	距坑壁 250 m	距坑壁 150 m	距坑壁 75 m	距坑壁 50 m

3.2 地块储粮库开挖监控点总变形曲线

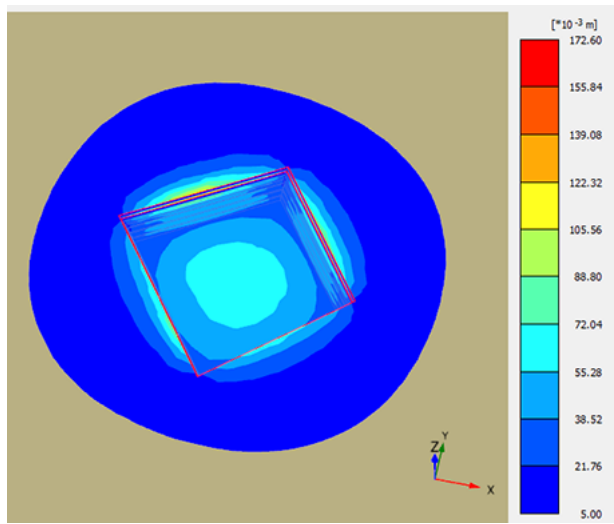
图7和图8分别为M-C本构模型与HS本构模型01地块储粮库各级开挖监控点总位移曲线。可知M-C本构模型01地块储粮库周边3 cm变形的影响圈距离坑壁约为45 m,HS本构模型01地块储粮库周边3 cm变形的影响圈距离坑壁约为50 m。

3.3 监控点沉降曲线和水平合位移曲线

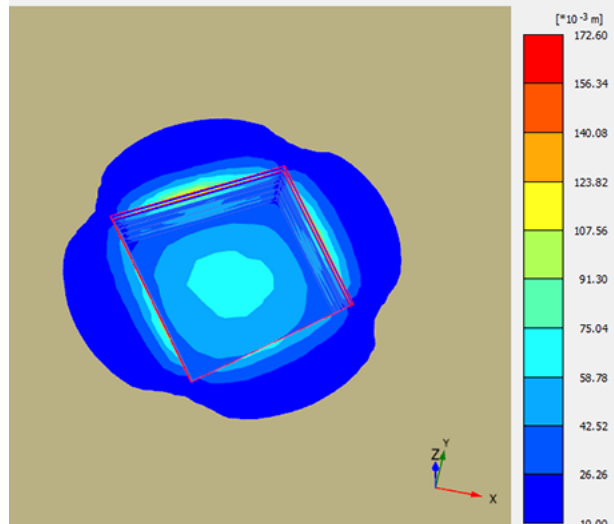
图9和图10分别为M-C本构模型与HS本构模型01地块储粮库各级开挖监控点沉降曲线。主要

规律为沉降曲线从弱风化岩层开挖前后位移曲线出现陡降,这表明地表变形曲线均在弱风化岩层开挖前后出现骤降。从图中又可知土体开挖引起的变形较大,但变形影响范围有限,仅限于基坑周边一定距离。

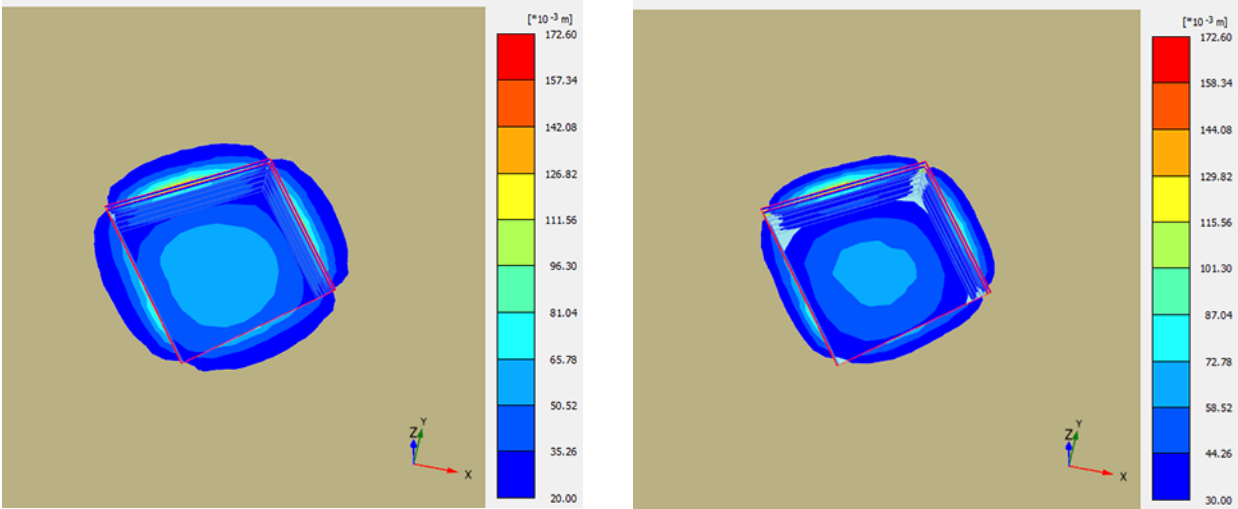
图11和图12分别为M-C本构模型与HS本构模型,01地块储粮库各级开挖监控点水平合位移曲线。主要规律为水平位移曲线从弱风化岩层开挖前后位移曲线出现陡降,且从位移量值来看,基坑开挖引起的水平变形远大于沉降变形,水平变形与沉降变形的比值,约为4:1。



(a)高地应力M-C本构模型第7级开挖0.5 cm影响

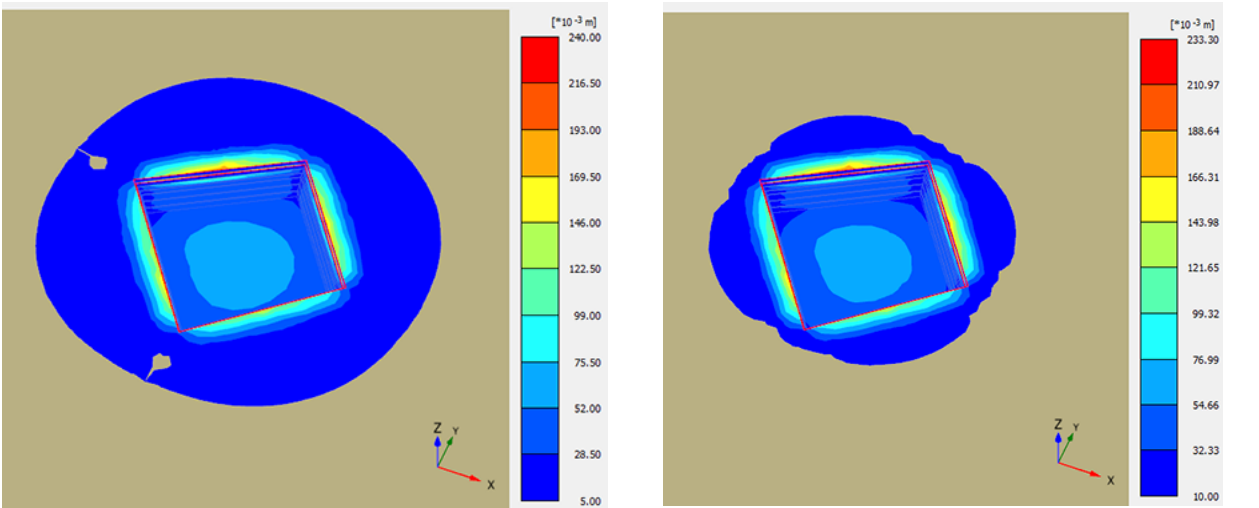


(b)高地应力M-C本构模型第7级开挖1 cm影响圈

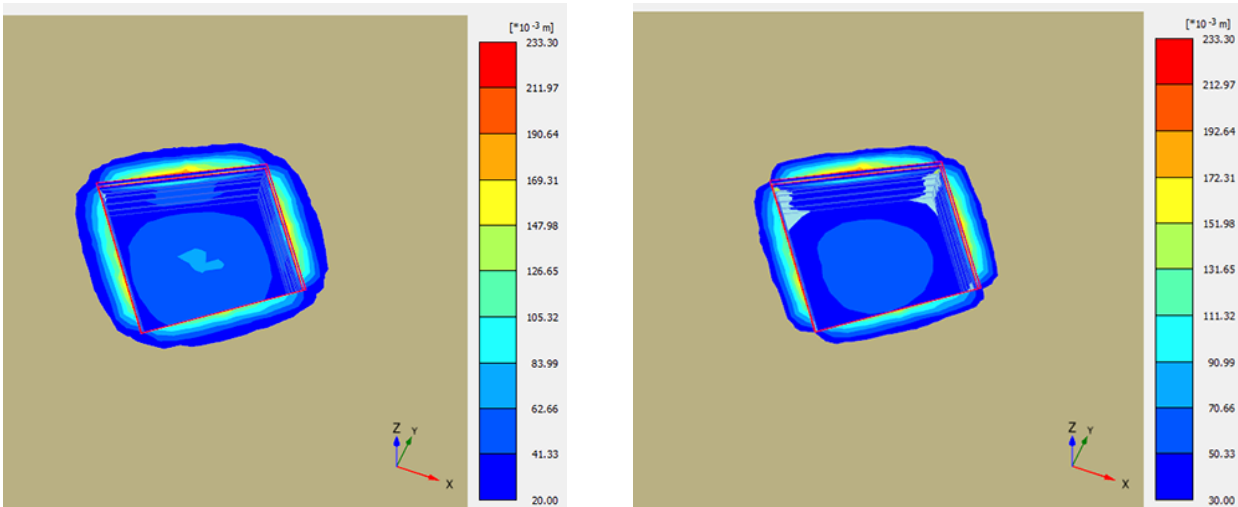


(c)高地应力 M-C 本构模型第 7 级开挖 2 cm 影响圈 (d)高地应力 M-C 本构模型第 7 级开挖 3 cm 影响圈
图 5 高地应力 M-C 本构模型最终开挖影响圈

Fig.5 The final excavation influence circle of High ground stress M-C constitutive model



(a)高地应力 HS 本构模型第 7 级开挖 0.5 cm 影响圈 (b)高地应力 HS 本构模型第 7 级开挖 1 cm 影响圈



(c)高地应力 HS 本构模型第 7 级开挖 2 cm 影响圈 (d)高地应力 HS 本构模型第 7 级开挖 3 cm 影响圈

图 6 高地应力 HS 本构模型最终开挖影响圈

Fig.6 The final excavation influence circle of High ground stress HS constitutive model

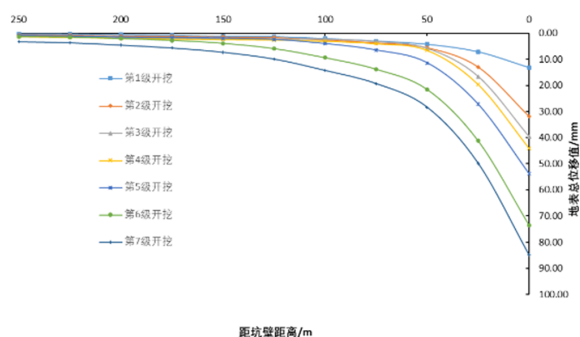


图7 M-C本构模型各级开挖监控点总位移曲线

Fig.7 The total displacement curves of excavation monitoring points at all levels of the M-C constitutive model

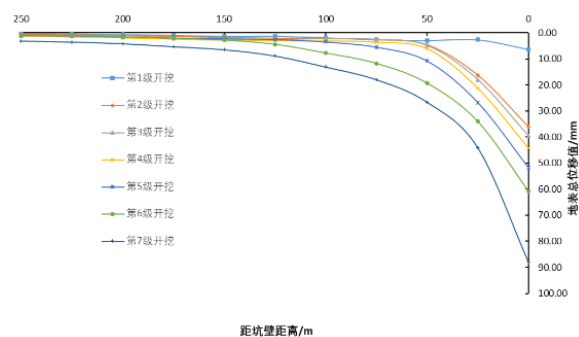


图8 HS本构模型各级开挖监控点总位移曲线

Fig.8 The total displacement curves of excavation monitoring points at all levels of the HS constitutive model

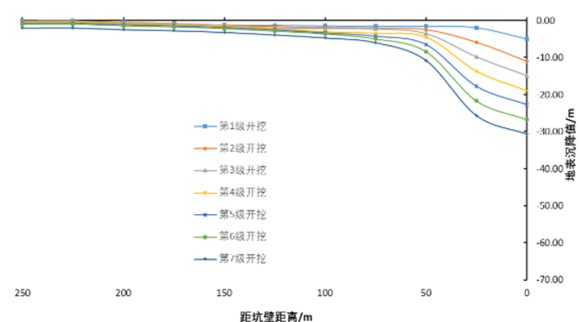


图9 M-C本构模型各级开挖监控点沉降曲线

Fig.9 The settlement curves of excavation monitoring points at all levels of the M-C constitutive model

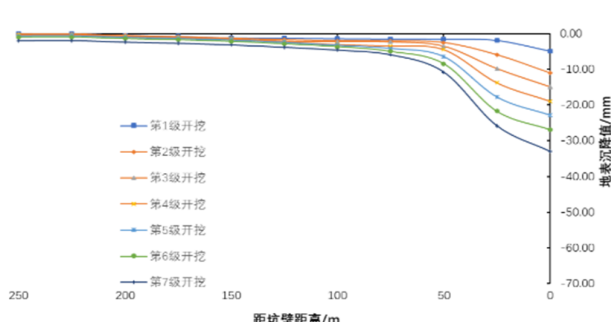


图10 HS本构模型各级开挖监控点沉降曲线

Fig.10 The settlement curves of excavation monitoring points at all levels of the HS constitutive model

同时由于HS本构模型土体的模量随着自重应力的增加而增大,但在土体表层模量普遍低于M-C本构模型的固定值。因而采用HS本构模型

时,计算所得位移稍大于采用M-C本构模型的计算结果。

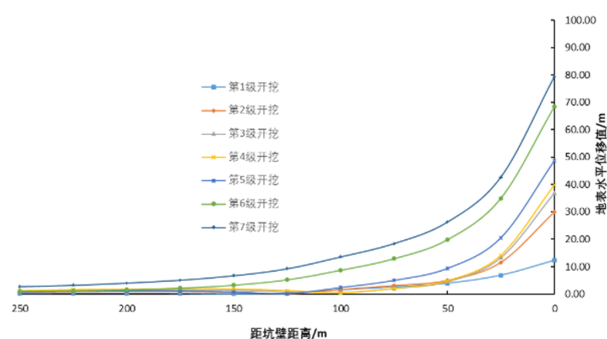


图11 M-C本构模型各级开挖监控点水平位移曲线

Fig.11 The horizontal displacement curves of the excavation monitoring points at all levels of the M-C constitutive model

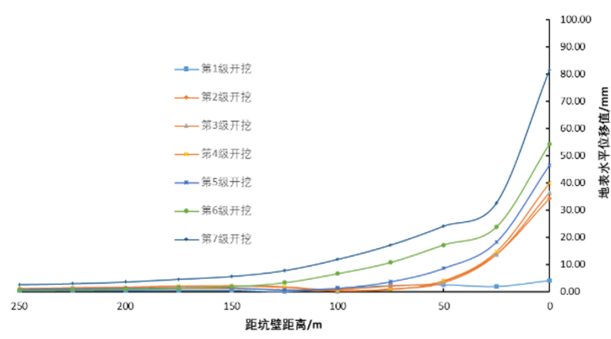


图12 HS本构模型各级开挖监控点水平位移曲线

Fig.12 The horizontal displacement curve of excavation monitoring points at all levels HS constitutive model

4 结论

通过采用三维数值模拟计算分析的方法,研究了拟建泉港地下储粮库开挖对周边环境的变形

影响范围情况,其主要结论如下:

(1)地下储粮库开挖过程中,岩体高水平地应力的释放是引起基坑周边水平变形的主要影响因素之一。

(2)地下水位下降会引起大范围土体的小幅度

沉降,而土体开挖会引起基坑周边土体的沉降,因此基坑降排水加开挖是引起场地周边变形的两种直接因素。

(3)场地浅表覆盖层及全、强风化层土体开挖过程产生的变形,对近场地周边的地表变形影响较大。因此后续围护设计阶段,须重点加强对浅表层土体的开挖支护措施。

(4)土体采用M-C本构模型与HS本构模型,得到的变形规律基本一致,采用HS本构模型计算所得位移稍大于采用M-C本构模型的计算结果。

参考文献

- [1] 梁佳佳. 地下水封石油储备库工程地质条件分析及空间布置优化设计研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [2] 欧阳顺,陈云,黄雪阳. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的数值分析与研究[J]. 四川水泥,2022(12):226-228.
- [3] 文杰,郭平,孙梦尧,等. 深基坑开挖对相邻共墙基坑影响规律研究[J]. 工程建设,2022,54(10):1-6.
- [4] 张婉吟,孙昌利,张挺,等. 紧邻地铁深基坑开挖对周边环境的影响分析[J]. 广东水利水电,2022(10):69-74.
- [5] 黄翔宇,李顺群,芮子航,等. 基坑开挖对临近土体三维应力的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(06):189-195.
- [6] 赵平,王占棋. 深基坑开挖引起的地表沉降变形分析[J]. 安徽工程大学学报,2022,37(05):73-79.
- [7] 徐中华,王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学,2010,31(01):258-264+326.
- [8] 葛鹏,周爱兆. 常用土体本构模型在复杂环境深基坑数值计算中的选用[J]. 地质学刊,2020,44(Z1):192-197.
- [9] Zhao X, Zhu Q. Analysis of the surface subsidence induced by sublevel caving based on GPS monitoring and numerical simulation[J]. Natural Hazards, 2020, 103(3):3063-3083.
- [10] Rehman S, Sahana M, Dutta S, et al. Assessing subsidence susceptibility to coal mining using frequency ratio, statistical index and Mamdani fuzzy models: evidence from Raniganj coalfield, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(16):1-18.
- [11] 胡海英,张玉成,杨光华,等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):431-439.
- [12] 左殿军,史林,李铭铭,等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):391-395.
- [13] 郭秋. 基于花岗岩非均质性压缩破坏及流固耦合数值模拟研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
- [14] 李博识. 基于流固耦合的盾构隧道施工对地下管线变形的影响研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [15] 丁俊凯. 基坑开挖对侧方既有盾构隧道影响的数值分析[D]. 舟山:浙江海洋大学,2019.
- [16] 颜超. 基于Midas GTS分析深大基坑开挖对邻近建筑物的影响[J]. 建筑施工,2021,43(06):1131-1134.
- [17] 江杰,张探,欧孝夺,等. 软土地基基坑开挖对临近桩变形影响的时效分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11):206-215.