

地基土模型参数对基坑水平位移影响分析

赵旭光¹, 王 博², 贾 凯³, 钟丽佳⁴, 朱 良⁵

[1. 广州市交通设计研究院有限公司, 广东 广州 511430; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 山东土地集团(滕州)有限公司, 山东 滕州 277599; 4. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 5. 国家知识产权局专利局专利审查协作广东中心, 广东 广州 510535]

摘要: 目前基坑开挖计算中常采用摩尔-库伦破坏准则进行土体参数的描述, 但土体作为碎散的、三相的非连续性材料, 仅用弹性模型难以真实反映其实际力学特性, 导致计算结果与实际施工情况存在较大偏差。而非弹性材料模型(如弹塑性模型)能够考虑土体模量随应力状态的变化, 更符合土体的真实应变特性。以某基坑开挖工程为研究对象, 基于ABAQUS有限元软件开展数值模拟计算, 分别采用摩尔-库伦破坏准则和邓肯-张模型参数, 对比分析两种模型对基坑水平位移的影响。研究结果表明, 邓肯-张模型能够更准确地描述土体的非线性力学行为, 对基坑水平位移的预测更为精确, 为基坑开挖工程中水平位移的控制提供了理论依据和参考。

关键词: 土体参数; 非线性; 基坑稳定; ABAQUS

中图分类号: TU46+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0390-04

Analysis on Influence of Foundation Soil Model Parameters on Horizontal Displacement of Foundation Pit

ZHAO Xuguang¹, WANG Bo², JIA Kai³, ZHONG Lijia⁴, ZHU Liang⁵

[1. Guangzhou Traffic Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 511430, China; 2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xian 710075, China; 3. Shandong Tudi Group (Tengzhou) Co., Ltd., Tengzhou 277599, China; 4. Institute of Geotechnical Engineering, Xian University of Technology, Xian 710048, China; 5. Guangdong Center for Patent Examination Cooperation of the Patent Office of the National Intellectual Property Administration, Guangzhou 510535, China]

Abstract: At present, More-Coulomb failure criterion is often used to describe the soil parameters in the excavation calculation of foundation pit. However, the soil mass is a fragmented and three-phase discontinuous material, and it is difficult to reflect its actual mechanical properties with elastic model only, which results in a large deviation between the calculation results and the actual construction conditions. But the non-elastic material model (such as elastoplastic model) can consider the change of soil modulus with stress state, which is more consistent with the real strain characteristics of soil mass. Taking a foundation pit excavation project as the research object, the numerical simulation calculation is carried out based on ABAQUS finite element software. The Moore-Coulomb failure criterion and the Duncan-Zhang model parameters are adopted respectively to compare and analyze the influences of the two models on the horizontal displacement of foundation pit. The results show that the Duncan-Zhang model can describe the nonlinear mechanical behavior of soil more accurately and predict the horizontal displacement of foundation pit more accurately, which provides the theoretical basis and reference for the control of horizontal displacement in the excavation engineering of foundation pit.

Keywords: soil parameters; nonlinearity; foundation pit stability; ABAQUS

0 引言

在新型城镇化与地下空间集约化开发的协同推进背景下, 地下综合体、轨道交通枢纽等大型地下工

程密集涌现。基坑开挖深度及面积越来越大, 基坑支护设计与施工已经成为工程中的热点类问题。基坑结构属于临时性结构, 建设方对缩短支护工期、降低支护成本的要求越来越高。

近年来, 数值计算技术的发展为深基坑变形精准预测提供了新方法。数值仿真计算中非线性地基土模型在基坑开挖分析中得到了广泛应用。非线性

收稿日期: 2025-02-28

作者简介: 赵旭光(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程勘察设计工作。

模型能够更准确地描述土体的应力-应变关系,尤其是在考虑土体塑性变形和破坏机制时,具有更高的精度^[1-3]。

经调研发现,现有基坑工程计算时,参数都选取的是摩尔库伦抗剪强度参数^[4-7],鲜有设计人员从弹塑性角度考虑选取土体参数,勘察报告中也鲜有提供弹塑性计算参数的^[8-9]。

王卫东等^[10-11]指出连续介质有限元方法是基坑开挖分析最有效的方法,但是其中的关键是要选用合适的土体本构模型以及合理的材料参数。陈贇等^[12-14]指出基坑的变形特征与破坏模式应通过有限元法模拟施工过程,进行数值计算,并对结果进行分析,而这其中土体本构关系的选择最为关键。徐中华等^[15]研究认为对于黏土地层的基坑开挖数值计算分析,应采用考虑的塑性和应变硬化特征等因素的硬化类弹塑性模型。李连祥等^[16]研究发现,基坑开挖深度大于 15 m 时,存在深度效应,摩尔库伦准则已经不适用,无法反映基坑土体的实际变形。

基于此,本文从选用不同计算准则和模型参数着手,以某基坑支护工程为研究对象,用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟计算,研究开挖过程中不同参数模型的选定对基坑开挖水平位移的影响规律。

1 工况模型及材料模型参数

1.1 工况模型

为了对比分析不同材料模型参数对基坑开挖工程的影响,我们基于某基坑工程的支护设计方案,对实际地层条件进行简化,以重点说明不同参数的选用对基坑稳定性等方面的影响差异。实际基坑支护方案为 800@1 000 mm 的灌注桩+4 层内支撑结合坑周一圈双轴止水帷幕,灌注桩桩长设计 20 m。支护设计剖面见图 1。

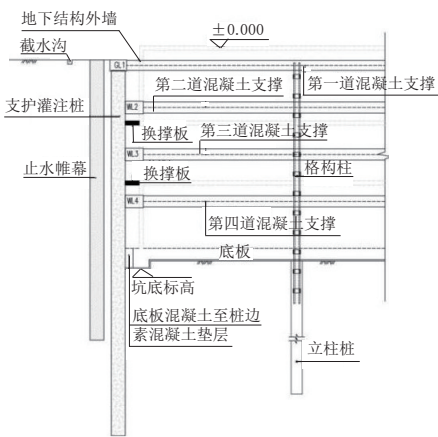


图1 基坑支护设计剖面图

将实际底层简化为沿深度方向的同一均质土体,基坑开挖深度、支护方案还用实际的基坑支护方案。用 ABAQUS 对基坑开挖及支护施工全过程进行有限元计算和模拟。以基坑中间部位取一半基坑进行建模、数值计算。基坑开挖深度 10 m, 基坑外周土体水平方向取 3 倍挖深、深度方向都取 4 倍挖深,即基坑模型深度 40 m、宽 60 m。建立的模型图及有限元计算网格划分见图 2。

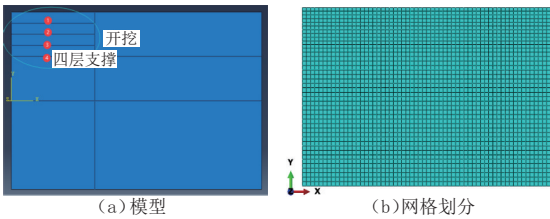


图2 基坑开挖有限元计算模型和网格划分

由于基坑支护方案中坑外周有一圈止水帷幕,所以计算中不考虑地下水渗流对坑壁稳定性的影响,单一分析两套不同土体参数模型对稳定性等方面的影响差异。

1.2 材料模型参数

对于本次数值模拟计算分析,土体线弹性参数选用了摩尔-库伦准则,强度参数见表 1,非线性模型参数选用了邓肯-张模型非线性模型,具体参数见表 2。

表1 土体摩尔库伦准则参数

指标	土体 重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 ν	黏聚力 C/kPa	内摩 擦角 φ / ($^\circ$)	弹性 模量 E/GPa	水平土 压力系 数 K_0
参数值	0.2	10	10	30	28	2

表2 土体邓肯-张模型参数

指标	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	破坏比 R_f	K	n	D	F	G
参数值	10	30	0.8	1 000	0.5	0	0	0.3

不同土体模型参数下基坑开挖有限元模拟时基坑支护结构的内支撑体系的支撑刚度设定相同,进行基坑分布开挖施工全过程有限元模拟计算。基坑开挖至坑底标高时基坑的水平位移云图见图 3。

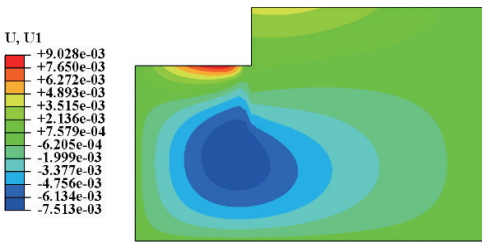


图3 基坑开挖至坑底时的水平位移云图

2 不同模型参数下水平位移有限元计算结果与分析

首先整理出开挖至各层支撑底标高时坑壁土体沿开挖深度范围内不同深度处的水平位移,先绘制土层参数按不同模型选用时开挖过程中基坑侧壁水平位移的曲线图,见图4。

从图4中可以明显看出,土层参数按不同模型选用时,不同开挖步时基坑沿深度方向各深度位置处的水平位移差异较大:土体参数按摩尔-库伦破坏准则选用时,随着基坑开挖深度增加,水平位移差异不大,桩顶位置处的基坑土体位移向坑外方向,桩底位置的位移向坑内方向,即支护桩发生以坑底位置处为中心点的整体倾斜变形;土体参数按邓肯-张模型选用时,随着挖深越大,坑壁的整体水平位移增大,尤其是开挖到第4道支撑及坑底位置时,水平位移明显大于前两步开挖步,且坑顶水平位移也向坑内变形,最大水平位移为第4开挖步开挖到坑底时坑底土体的水平位移。

为了进一步对比不同土体模型参数对基坑水平位移的影响,分别绘制各个开挖步时,不同参数计算的水平位移对比曲线,见图5。图例中“摩尔-库伦-1”表示有限元计算中土层参数是摩尔库伦参数,基坑

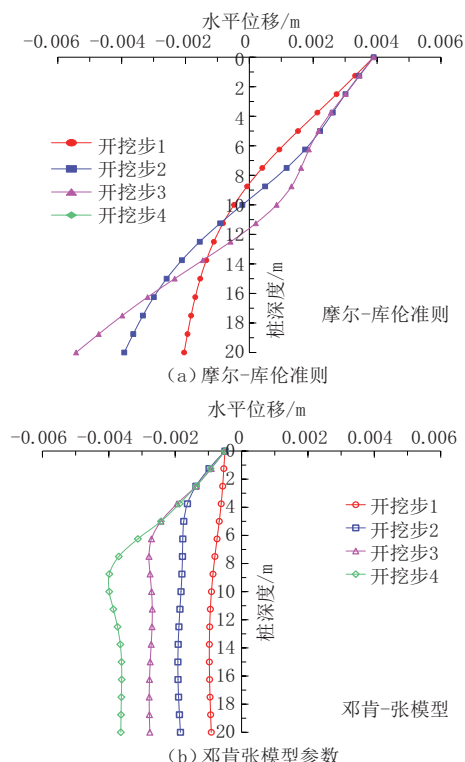


图4 参数按不同准则选用时各开挖步时坑壁水平位移

开挖到第一层支撑标高位置;“ $E-\mu-1$ ”表示有限元计算中土层参数是邓肯-张参数,基坑开挖到第一层支撑标高位置。有限元计算中水平位移U1正值方向向右,提取的水平位移数据是负值表示坑壁位移向坑内,正值表示水平位移向坑外。

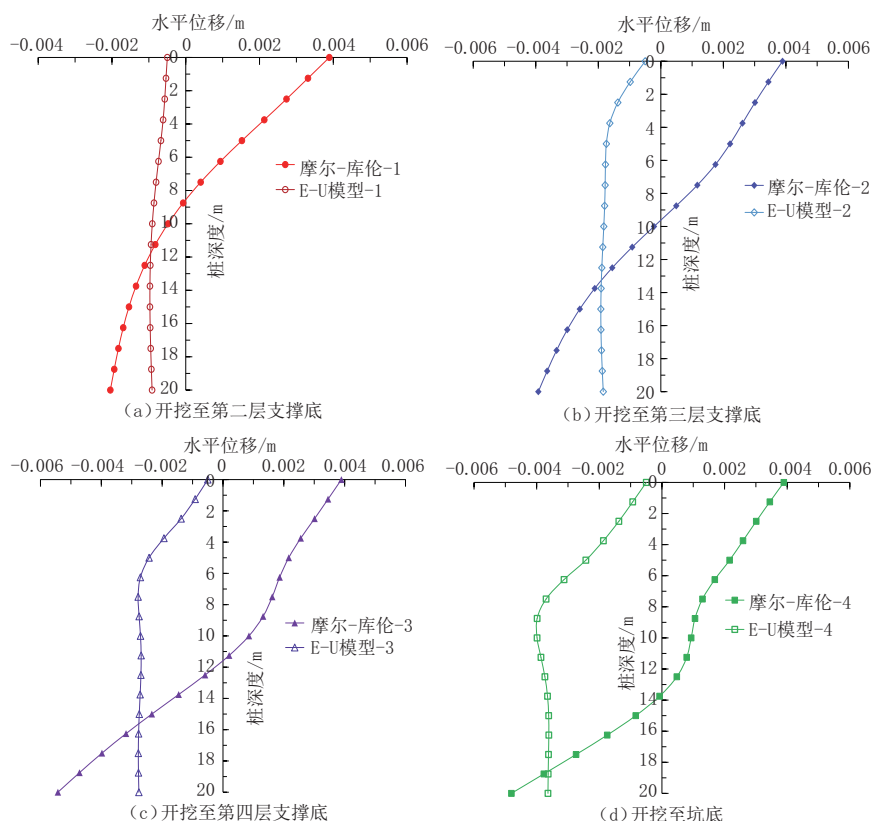


图5 各开挖步时土体按不同模型参数计算的水平位移对比

从图5中可以明显看出,随着挖深的增加,不同土体模型参数计算出的水平位移差异增大,土层参数按摩尔-库伦准则算得的坑顶水平位移方向向坑外,且随着挖深的增大水平位移值几乎不变,土层参数按邓肯-张模型参数选用时,随着挖深增大基坑沿深度方向水平位移变化较大:开挖至第二层支撑底部时,基坑挖深2.5 m,摩尔-库伦参数计算的桩顶位移(基坑水平位移)向坑外4.0 mm,坑边9.0 m深度处的桩位移约为0,桩底向坑内发生约2 mm的水平位移,而邓肯-张模型参数计算的水平位移为整体向坑内发生位移,桩顶水平位移约0.5 mm;开挖至第三层支撑底部时,基坑挖深约5.0 m,摩尔-库伦参数计算的桩顶位移仍是向坑外且值与第一开挖步差异不大,坑边9.5 m深度处的桩位移约为0,桩底向坑内发生约4.0 mm的水平位移,邓肯-张模型参数计算的整体向坑内的位移明显增大,桩顶水平位移也与第一开挖步差异不大,而桩底水平位移增大到约2.0 mm;开挖至第四层支撑底部时,基坑挖深约7.5 m,摩尔-库伦参数计算的桩顶位移仍是向坑外且值仍几乎不变,坑边11.5 m深度处的桩位移约为0,桩底向坑内发生约5.0 mm的水平位移,邓肯-张模型参数计算的位移增加较明显,但桩顶的水平位移仍然变化不大,7 m深度处的水平位移最大,约3.0 mm;开挖至坑底时,基坑挖深10.0 m,摩尔-库伦参数计算的桩顶位移仍是向坑外,且值仍几乎不变,坑边13.5 m深度处的桩位移约为0,桩底向坑内发生约5.0 mm的水平位移,邓肯-张模型参数计算的位移增加较明显,但桩顶水平位移仍然变化不大,9 m深度处的水平位移最大,约4.0 mm。

有限元计算中,土体的模型选用对基坑位移计算结果影响显著:随着挖深的增加,不同土体模型参数计算出的水平位移差异逐渐增大。摩尔-库伦准则计算得到的坑顶水平位移方向始终向坑外方向发展,且位移值随挖深变化不大,这与实际工程状况不符;而邓肯-张模型参数计算得到的水平位移则整体向坑内发展,且位移值随挖深增加而显著增大,这符合实际工程中坑边土体的位移发展趋势。

3 结 语

本研究通过对比分析摩尔-库伦准则和邓肯-张

模型参数计算的不同挖深下基坑水平位移,得出以下结论:

大量实际基坑工程监测数据表明,基坑水平位移随挖深增大而增大。本研究中数值试验数据结果表明,邓肯-张模型参数计算得到的水平位移变化趋势与实际监测数据更为吻合,说明该模型能够更好地反映土体的非线性变形特性,更适用于深基坑开挖的水平位移预测。

在深基坑工程设计和施工过程中,建议采用邓肯-张模型参数进行水平位移计算,并结合实际监测数据,对基坑变形进行动态预测和控制,以确保工程安全。通过本文的研究,期望能为基坑开挖工程中水平位移的控制提供更为科学的指导。

参考文献:

- [1] 赵明,王强.非线性地基土模型在深基坑开挖分析中的应用[J].岩土力学,2019,40(7):2675-2682.
- [2] 刘洋,李华.深基坑开挖中土体塑性变形的数值模拟研究[J].岩土工程学报,2020,42(8):1523-1530.
- [3] 张伟,陈刚.非线性土体模型在深基坑支护设计中的应用[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1123-1130.
- [4] 陈萍,王卫东,丁建峰.相邻超大深基坑同步开挖的设计与实践[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):555-558.
- [5] 高强.圆环支撑在深大基坑工程中的应用[J].建筑结构,2011,41(增刊1):1350-1352.
- [6] 王卫东,沈健,翁其平,等.基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J].岩土工程学报,2006,28(增刊1):1340-1345.
- [7] 张明,李伟.深基坑支护结构设计中的摩尔库伦参数选取研究[J].岩土工程学报,2018,40(5):823-830.
- [8] 王磊,李强.深基坑支护设计中弹塑性参数的选取与优化[J].岩土力学,2022,43(5):1789-1796.
- [9] 刘伟,张强.勘察报告中弹塑性计算参数的缺失问题及其解决方案[J].岩土工程学报,2022,44(6):1125-1132.
- [10] 王卫东,王浩然,徐中华.上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J].岩土力学,2031,34(6):1766-1774.
- [11] 王卫东,张伟.连续介质有限元方法在深基坑开挖分析中的应用[J].岩土工程学报,2017,39(4):712-719.
- [12] 陈赞,罗敏敏,夏能武,等.软土HSS模型参数现有试验成果统计分析[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):197-201.
- [13] 丁钰津,褚峰,梁发云.HSS模型在紧邻地铁深基坑工程分析中的应用[J].山西建筑,2014,40(6):60-62.
- [14] 陈赞,王磊.深基坑开挖过程中土体本构关系的选择与优化[J].岩土工程学报,2019,41(3):521-528.
- [15] 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(1):258-264.
- [16] 李连祥,李胜群,苏日嘎拉图.土岩双元基坑数值分析方法与锚索回收方案[J].山东大学学报(工学版),53(3):1-9.