基坑内支撑条件下土压力及其影响效应解析解*

汪翔[1],张春龙[1],段江涛[2],杨少春[1],吴磊[1],蒋继勇[1],汪亦显[2]

(1.安徽明生电力设计有限公司, 安徽 合肥 230061;
2.合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对基坑工程土压力计算问题,建立了一种土压力解析方法,分析了各因素影响效应。基于库伦土压力理论的基本假设,综合考虑墙背和填土间的摩擦角、土体内摩擦角、基坑开挖深度等因素,构建了土压力计算模型,提出了开挖扰动引起土压力及其影响范围的量化公式。通过影响因素敏感性分析,明确了有无钢支撑条件下各因素对非开挖影响范围的影响顺序,研究了不同工况和开挖阶段下影响范围的变化规律,并进行对比验证。结果表明,两者在土压力沿基抗开挖深度分布形态上一致,验证了模型的准确性。敏感性分析表明,无支撑时基坑开挖深度对开挖影响范围的作用最显著,设置钢支撑后基坑开挖深度仍为主要控制因素。本文模型可较好地量化分析安徽合肥某能源开发基地配套项目110 kV变电站基坑开挖过程中土压力分布及扰动影响范围,后续可为相关能源及矿产资源开发基础设施基坑工程设计分析提供理论参考。

关键词:基坑;内支撑;土压力;影响效应;解析解

中图分类号:TU43;TD31 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0192-10

Analytical Solution of Soil Pressure and Its Influence Effect Under Inner Support Conditions of a Foundation Pit

Wang Xiang[1], *Zhang Chunlong*[1], *Duan Jiangtao*[2], *Yang Shaochun*[1], *Wu Lei*[1], *Jiang Jiyong*[1], *Wang Yixian*[2]

(1.Anhui Mingsheng Electric Power Design Co., Ltd., Hefei, Anhui 230061, China;
2.Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Aiming at the calculation problem of soil pressure in foundation pit engineering, an analytical method for soil pressure was established, and the influence effects of various factors were analyzed. Based on the basic assumptions of Coulomb's soil pressure theory, and fully considering the friction angle between the wall back and backfill, the soil internal friction angle, foundation pit excavation depth and other factors, a soil pressure calculation model was constructed, and quantitative formulas for soil pressure and its influence range induced by excavation disturbance were proposed. Through the sensitivity analysis of influencing factors, the influence order of each factor on the excavation influence range was clarified under the conditions with or without steel supports. The variation laws of the influence range under different working conditions and excavation stages were studied, and comparative verification was carried out. The results show that the distribution patterns of soil pressure along the foundation pit excavation depth from the two methods are consistent, which verifies the accuracy of the model. Sensitivity analysis shows that the excavation depth of a foundation pit exerts the most significant effect on the excavation influence range without supports, and the excavation depth of the foundation pit remains the main controlling factor after steel supports are installed. The model proposed in this paper can quantitatively analyze the soil pressure distribution and disturbance influence range during the foundation pit excavation of a 110 kV substation as part of a supporting project of an energy development base in Hefei, Anhui Province. The results can provide a theoretical reference for the design and analysis of foundation pit engineering of related energy and mineral resources development infrastructure.

Key words: Foundation pit, Inner support, Soil pressure, Influence effect, Analytical solution

0 引言

地下资源开发不断向深部拓展,伴随露天转地下开采及超深基坑工程的持续发展,其建造难度亦呈指数式攀升[1]。对于矿山基坑而言,由于开挖过程中需架设内支撑与围护结构,支护体系显著改变

* **收稿日期**:2025-10-10
基金项目:国家自然科学基金项目(42077249);国网安徽省电力有限公司科技项目(AHDLKJXMS2025086)
作者简介:汪翔(1980—),男,安徽望江人,高级工程师,主要从事能源基建技术管理工作。E-mail:18225691263@163.com
通信作者:汪亦显(1980—),男,湖北黄冈人,博士,教授,主要从事能源基建技术创新工作。E-mail:wangyixian2012@hfut.edu.cn

了有限范围内岩土体的位移模式,其应力-应变路径明显区别于常规工况,应力、应变呈现高度非线性。精准刻画此类复杂应力状态下有限域围岩压力,已成为当前能源基建、矿山开发、城市岩土工程等领域亟需突破的关键科学问题[2]。

目前,国内外学者针对有限土体土压力已经开展了一系列相关研究,陈页开等[3]基于有限元框架,模拟墙-土界面剪切滑移,系统探讨了挡墙位移模式、界面摩擦及土体刚度对刚性挡墙被动土压力大小与分布的共同影响。卢国胜[4]基于朗肯框架构建位移相关土压力模型,量化了主动、被动与静止状态的位移依赖性,其预测曲线与有限元结果高度一致。殷德顺等[5]构建"应力路径试验-理论解析"耦合方法:以试验获取土压力-应变关系,结合解析位移-应变映射,导出土压力-位移本构,通过实例与有限元验证其有效性。赵明华等[6]基于非线性桩-土模型,以杆系有限元叠加 Newton-Raphson 迭代求解位移,回代得出内力与土压力,通过算例验证其简洁性精准性。杨明辉等[7]基于圆弧小主应力拱与墙-土摩擦极限平衡,导出主应力偏转角建立有限宽度主动土压力解析式。徐日庆等[8]基于塑性上限破裂角与多滑裂面侧压系数,构建有限黏土主动土压力解析式。Cao 等[9]引入圆弧薄层单元技术构建土压力解析框架,可更真实地反映土体内部应力传递机制。Chen 等[10]依托极限平衡原理并引入平面滑裂面假设,推导了适用于受限宽度填土的主动土压力解析解,系统阐明了墙后土体空间尺寸对滑裂角及土压力分布的调控效应。王闫超等[11]和 Hu 等[12]基于薄层单元法构建无黏性有限土体土压力解析模型,朗肯与库仑解为其特例;破裂角随参数动态演化,无限域时逼近库仑,有限域时显著偏离且与数值解高度一致,验证普适性与精准性。高幸等[13]和应宏伟等[14]分别基于基坑三维特性,提出以坡顶位移反演空间效应下主动、被动土压力,并以嵌固稳定安全系数最小为目标优化悬臂支护;主动土压力对空间效应更敏感,安全系数随距坑角距离的减小呈幂函数增大的规律。Miao 等[15]引入塑性上限框架并设定平面滑裂面,构建有限宽度填土主动土压力显式解,系统阐明内摩擦角、宽高比、地震惯性力及超载对其量值与分布的耦合控制规律。李志浩等[16]、Xu 等[17]和 Yang 等[18]针对地震作用下悬臂式挡土墙的主动土压力问题,同时考虑到墙背预设位置的多样性,提出了墙后填土的 5 种潜在失稳破坏模式。基于此,建立并推导了地震条件下墙背主动土压力的理论计算公式。Huang 等[19]、Liu 等[20]引入机动上限框架与多块体速度场,系统解析地震激励下抗剪强度参数及上下游水位对挡墙滑裂面形态与安全系数的耦合调控机制。

张常光等[21]以 Sigmoid 函数刻画挡墙位移-土压力非线性关系,构建满足初值与拐点条件的简化解析式;通过试验-数值联合反演确定唯一参数。赖丰文等[22]利用 FELA 揭示平动有限填土"反射式"多滑裂破坏机制,并给出非滑裂/滑裂区主动土压力及合力、作用点显式解。

尽管有限土体滑裂面与土压力解析的研究已趋成熟,但针对土压力分布方式及影响区域仍需深入研究。随着矿业工程技术在城市环境中的延伸应用,深基坑工程逐渐成为矿业力学理论的重要拓展领域。能源基础设施基坑的开挖扰动、土(岩)体应力重分布及支护响应,与矿业工程中地下巷道的围岩-支护相互作用机理具有高度一致性。因此,采用矿业工程的理论体系对其进行分析具有重要参考价值。

本文以安徽合肥某能源开发基地配套项目 110 kV 变电站基坑为例,构建多因素耦合的主动土压力显式模型,给出基坑开挖扰动范围的量化表达式;经有限元对比验证,理论解与数值解沿深度分布高度一致,从而验证其可靠性。研究旨在为能源及矿产资源开发类基础设施工程设计分析提供理论依据。

1 影响范围理论分析

基坑支护形式不同,导致土压力计算逻辑也不同:一类为无内支撑体系——重力墙、悬臂墙、锚杆排桩及岩质喷锚等,其土压力可不计支撑轴力;另一类为内支撑-支护组合体系,必须计入支撑轴力对土体应力场的扰动。此外,土压力大小随土体或挡墙位移量的变化而同步变化。

研究表明[23],挡墙侧移量达(1×10^{-4} ~ 1×10^{-3})倍开挖深度时,主动土压力即可充分发挥;鉴

于工程实测位移普遍超越主动土压力充分发挥的上限值,因此,在构建土压力模型时,默认墙后土体处于主动极限平衡。

1.1 不考虑开挖基坑支撑影响土体土压力

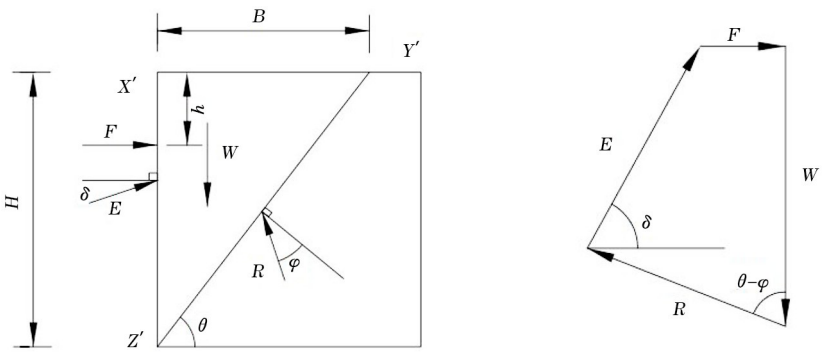
在构建坑间土压力分析模型时,作出如下基本假定。(1)有限土体的潜在破裂面被简化为平面,填土沿该滑动面发生整体滑移。(2)土体为均质黏土或均质砂性材料。对于黏土,假定其处于干燥状态或短期不排水条件,并忽略孔隙水压力对土压力的影响。对于均质砂性材料,在分析中计入柔性支护结构与土体界面之间的摩擦效应。(3)将破坏土楔视为刚体,不考虑其内部的应力重分布与变形。(4)假设破坏土楔达到极限平衡状态,且其内、外作用关系满足静力平衡要求。

1.1.1 土体土压力计算

在基坑开挖过程中,当坑间有限土体发生滑动时,土体滑裂面向地表延伸并展开,从而形成稳定边界为三角形的滑动楔形体,如图 1 所示。依据极限平衡原理,能够推导出左边滑动体每延米土体重力 W 的表达式,见式(1)。

$$W=\frac{BH\gamma}{2} \tag{1}$$

式中:H 为基坑开挖深度;B 为开挖影响范围;γ 为土体容重。



(a) 土体受力示意 (b) 力的三角形

图 1 基坑开挖土体分析

Fig.1 Analysis of foundation pit excavation soil

此时,土的破裂角 θ 的表达式为:

$$\tan\theta=\frac{H}{B} \tag{2}$$

土体重力 W、土压力合力 E 及反力 R 形成闭合力的三角形,由几何关系可求得土压力合力 E 的表达式:

$$E=\frac{W\sin(\theta-\varphi)}{\cos(\theta-\varphi-\delta)} \tag{3}$$

式中:φ 为土体内摩擦角;δ 为墙背和填土间的摩擦角。

由于式(3)中土体重力 W 是 θ 的函数,故当 δ 和 φ 为定值后,E 就只是 θ 的单值函数,土的破裂角 θ 可由土压力合力 E 的极值求得,即 $\frac{\partial E}{\partial\theta}=0$,采用数值法解出 θ,令 $x=\tan\theta$,则 $\frac{\partial E}{\partial\theta}=\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\theta}$,有:

$$-2H^2\gamma\sin(\varphi+\delta)\cos\varphi x^2+4H^2\gamma\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi x+2H^2\gamma\cos(\varphi+\delta)\sin\varphi=0 \tag{4}$$

由公式(4)解得:

$$x=-\tan\varphi+\sqrt{\frac{\tan\varphi\cos\delta}{\sin(\varphi+\delta)\cos\varphi}} \tag{5}$$

此时将式(5)代入式(2)得:

$$B=\frac{H}{-\tan\varphi+\sqrt{\frac{\tan\varphi\cos\delta}{\sin(\varphi+\delta)\cos\varphi}}} \tag{6}$$

当基坑开挖深度 H、土体内摩擦角 φ、墙背和填土间的摩擦角 δ 确定时,代入式(6)求得 B。

关于土压力沿墙高的分布形式,可通过对式(3)求导得出,即:

$$e=\frac{\partial E}{\partial H}=\frac{B'H\gamma(\tan\theta\cos\varphi-\sin\varphi)+B\gamma(\tan\theta\cos\varphi-\sin\varphi)}{2[\cos(\varphi+\delta)+\sin(\varphi+\delta)]} \tag{7}$$

为了便于得出开挖影响范围 B 与墙背和填土

间的摩擦角 δ 及土的破裂角 θ 之间的关系,将式(6)化简为 B、φ 与 δ 相关的函数,记为 B'。

$$\frac{1}{\tan\theta}=B'=\frac{1}{-\tan\varphi+\sqrt{\dfrac{\tan\varphi\cos\delta}{\sin(\varphi+\delta)\cos\varphi}}} \tag{8}$$

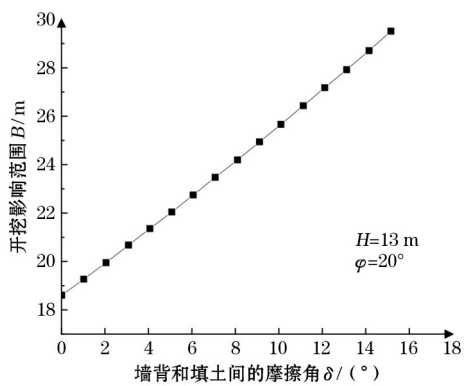
1.1.2 影响范围参数分析

由式(6)可知,开挖影响范围 B 与基坑开挖深度 H 有关,还受到土体内摩擦角 φ、墙背和填土间的摩擦角 δ 影响。本文依托安徽省某能源基础设施建设基坑,该工程基坑开挖深度 H 为 13 m,土体内摩擦角 φ 为 20°,墙背和填土间的摩擦角 δ 为 7°,依托工程的钢支撑相关参数见表 1。以此为数据基础,图 2 给出了不同情况下,开挖影响范围 B 随土体内摩擦角 φ、墙背和填土间的摩擦角 δ 和基坑开挖深度 H 三个因素变化的数值。

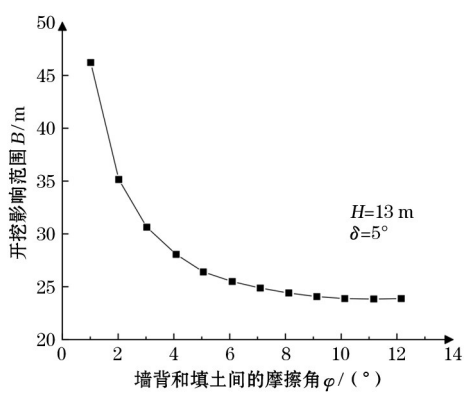
表 1 依托工程的钢支撑参数

Table 1 The steel support parameters of the project

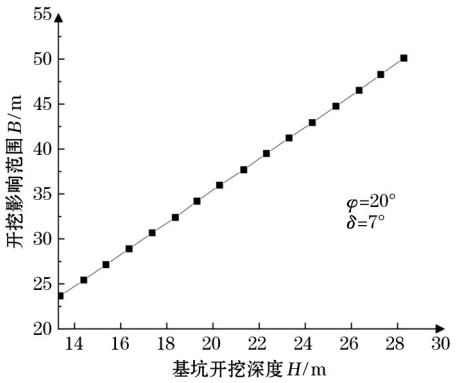
名称	规格尺寸/mm	密度/(kg/m³)	弹性模量/MPa	泊松比	预加轴力/kN	折减系数
第一道钢支撑	Φ800×16	7 800	210 000	0.27	1 620	0.70
第二道钢支撑	Φ609×16	7 800	210 000	0.27	1 620	0.70



(a) 开挖影响范围 B 随墙背和填土间的摩擦角 δ 的变化曲线



(b) 开挖影响范围 B 随土体内摩擦角 φ 的变化曲线



(c) 开挖影响范围 B 随基坑开挖深度 H 的变化曲线

图 2 开挖影响范围随各影响因素的变化曲线

Fig.2 The variation curves of excavation influence range with various influencing factors

由图 2(a)和图 2(c)可知,随着墙背和填土间摩擦角 δ 和基坑开挖深度 H 增大,开挖影响范围 B 也增大,符合工程实际,印证了本文理论的正确性。由图 2(b)可知,土体内摩擦角 φ 增大与开挖影响范围 B 成负相关,由此得出,采取土体加固可以有效缩减开挖影响范围。

1.2 考虑开挖基坑支撑影响土体土压力

1.2.1 土体土压力计算

在基坑设计中,当用分布力简化法(即将土压力分布折算为等效分布力)计算支护结构内力时,往往需要引入一个“分布力修正系数”,以反映实际土压力分布并非完全线性或三角形。同时也可以反映支护结构变形模式、坑深、开挖工况、土性参数等因素对土压力分布的影响。在进行修正计算时,可保证支护结构内力与变形计算更加接近实际。假定修正后的土压力合力 $F=\alpha ph$,其中 p 为分布力,α 为分布力修正系数,h 为支护结构的受荷高度[24]。

引入基坑支撑轴力影响时,采用刘国彬等[25]归纳的支撑力条件下挡墙主动土压力分布模式。$p=0.65\gamma H$,即 $F=0.65\alpha\gamma Hh$。其中土压力为主动状态时,α 取 0.4～0.45,土压力为被动状态时,α 取 0.55～0.65。

由图 1(b)可求得土压力合力 E 的表达式:

$$E=\frac{BH\gamma\sin(\theta-\varphi)-2F\cos(\theta-\varphi)}{2\cos(\theta-\varphi-\delta)} \tag{9}$$

按照前文的分析方法,土的破裂角 θ 可由合力 E 的极值求得,整理得:

$$\tan\theta=\frac{-H\sin\varphi\sin(\varphi+\delta)-\sqrt{H^2\sin^2\varphi\sin^2(\varphi+\delta)+H^2\sin\varphi\cos\varphi\sin(\varphi+\delta)\cos(\varphi+\delta)-1.3\alpha Hh\sin\delta\sin\varphi\cos(\varphi+\delta)}}{-H\cos\varphi\sin(\varphi+\delta)+1.3\alpha h\sin\delta} \tag{10}$$

此时将式(10)代入式(2)得:

$$B=\frac{-H\cos\varphi\sin(\varphi+\delta)+1.3\alpha h\sin\delta}{-\sin\varphi\sin(\varphi+\delta)-\sqrt{\sin^2\varphi\sin^2(\varphi+\delta)+\sin\varphi\cos\varphi\sin(\varphi+\delta)\cos(\varphi+\delta)-1.3\alpha\frac{h}{H}\sin\delta\sin\varphi\cos(\varphi+\delta)}} \tag{11}$$

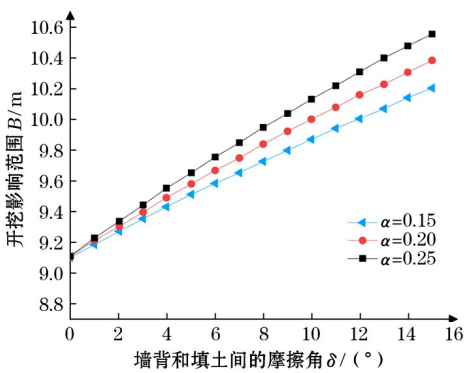
当基坑开挖深度 H、土体内摩擦角 φ、墙背和填土间的摩擦角 δ 确定时,代入式(11)求得 B。

关于土压力沿墙高的分布形式,可通过对式(9)求导得出,即:

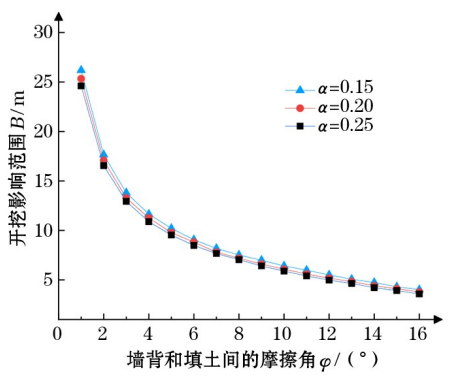
$$e=\frac{\partial E}{\partial H}=\frac{[B'H\gamma(\tan\theta\cos\varphi-\sin\varphi)+B\gamma(\tan\theta\cos\varphi-\sin\varphi)+BH\gamma\cos\varphi\tan'(\theta)-2F'(\cos\varphi+\tan\theta\sin\varphi)-2F\sin\varphi\tan'(\theta)]}{[\cos(\varphi+\delta)+\tan\theta\sin(\varphi+\delta)]}-\frac{[BH\gamma(\tan\theta\cos\varphi-\sin\varphi)-2F(\cos\varphi+\tan\theta\sin\varphi)]\cdot[\tan'(\theta)\sin(\varphi+\delta)]}{[\cos(\varphi+\delta)+\tan\theta\sin(\varphi+\delta)]^2} \tag{12}$$

1.2.2 影响范围参数分析

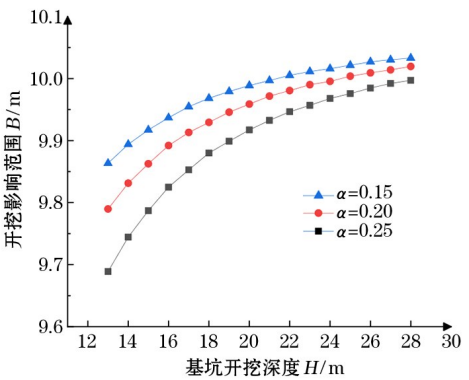
由式(11)可知,开挖影响范围 B 与基坑开挖深度 H 有关,还受到土体内摩擦角 φ、墙背和填土间的摩擦角 δ 影响。图 3 给出了不同情况下,开挖影响范围 B 土体内摩擦角 φ、墙背和填土间的摩擦角 δ 和基坑开挖深度 H 三个因素变化的数值。



(a) 开挖影响范围 B 随墙背和填土间的摩擦角 δ 的变化曲线



(b) 开挖影响范围 B 随土体内摩擦角 φ 的变化曲线



(c) 开挖影响范围 B 随基坑开挖深度 H 的变化曲线

图 3 不同分布力修正系数下开挖影响范围随各影响因素的变化曲线

Fig.3 The variation curves of excavation influence range with various influencing factors under different distribution force correction coefficients

图 3(a)给出了 $H=13$ m、$\varphi=20°$时开挖影响范围 B 随墙背和填土间摩擦角 δ 的变化关系;图 3(b)给出了 $H=13$ m、$\delta=5°$时 B 随 φ 的变化关系;图 3(c)为 $\varphi=20°$、$\delta=7°$时 B 随开挖深度 H 的变化关系。由图 3 可知,分布力修正系数越大,开挖影响范围减小越明显,符合工程实际,印证了本文理论的正确性。

2 影响效应敏感性分析

2.1 不考虑基坑支撑时的敏感性分析

借助正交设计[26],以最少试验量获取墙背和填

土间摩擦角、土体内摩擦角及基坑开挖深度 H 对开挖影响范围 B 的主效应排序,经对比遴选最优组合,为后续研究提供参考。

本次正交试验共有 9 种工况,其中墙背和填土间的摩擦角 δ 包括 5°、7°和 9°三个水平,土体内摩擦角 φ 包括 18°、20°和 22°三个水平,基坑开挖深度 H 包括 11 m、13 m 和 15 m 三种水平。正交试验因素水平及设计方案分别见表 2 和表 3。

表 2 正交试验因素水平

Table 2 Factor levels of orthogonal test

因素水平	墙背和填土间的摩擦角 δ/(°)	土体内摩擦角 φ/(°)	基坑开挖深度 H/m
1	5	18	11
2	7	20	13
3	9	22	15

表 3 正交试验设计方案

Table 3 Orthogonal test design scheme

试验序号	墙背和填土间的摩擦角 δ/(°)	土体内摩擦角 φ/(°)	基坑开挖深度 H/m
1	5	18	11
2	5	20	15
3	5	22	13
4	7	18	15
5	7	20	13
6	7	22	11
7	9	18	13
8	9	20	11
9	9	22	15

按照表 3 的正交试验设计方案,生成 9 组工况,采用前述公式计算对应开挖影响范围 B;继而求取各因素极差并排序,确定主控次序。K_i 为单因素水平值,i 取值为 1,2,3,分别对应墙背和填土的摩擦角、土体内摩擦角、基坑开挖深度这 3 个因素,以 K_1 为例,其求解公式为:

$$K_1=y_1+y_2+y_3 \tag{13}$$

式中,y_1,y_2 和 y_3 为多次正交试验结果。

k_i 为平均指标,即试验结果的平均值,以 k_1 为例,其计算公式为:

$$k_1=K_1/3 \tag{14}$$

而极差 R 的计算公式为:

$$R=\max(k_1,k_2,k_3)-\min(k_1,k_2,k_3) \tag{15}$$

对墙背和填土间的摩擦角 δ、土体内摩擦角 φ、基坑开挖深度 H 这 3 个影响因素进行分析,据上文公式对正交结果进行数据处理,得出 3 种因素对试验指标影响程度,见表 4。

表 4 不考虑基坑支撑时的开挖影响范围极差结果

Table 4 Range results of excavation influence range without foundation pit support

分析项	墙背和填土间的摩擦角 δ	土体内摩擦角 φ	基坑开挖深度 H
K_1	66.093	68.558	59.412
K_2	70.001	69.707	70.225
K_3	74.583	72.412	81.040
k_1	22.031	22.583	19.804
k_2	23.334	23.236	23.408
k_3	24.861	24.137	27.013
极差 R	2.830	1.554	7.209
主次顺序		3>1>2	

综上所述,以上 3 个因素对开挖影响范围 B 影响程度顺序为:基坑开挖深度 H>墙背和填土间的摩擦角 δ>土体内摩擦角 φ。

2.2 考虑开挖基坑支撑的敏感性分析

按照前文的分析方法,同样设置 9 种工况,其中墙背和填土间的摩擦角 δ 取值包括 5°、7°和 9°,土体内摩擦角 φ 取值包括 18°、20°和 22°,基坑开挖深度 H 取值包括 11 m、13 m 和 15 m,研究其对开挖影响范围 B 的影响。

最终,依据前述公式对正交试验结果进行数据处理,得出在 3 种因素影响效应下的显著性排序。

表 5 考虑基坑支撑时的开挖影响范围极差结果

Table 5 Range results of excavation influence range with foundation pit support

分析项	墙背和填土间的摩擦角 δ	土体内摩擦角 φ	基坑开挖深度 H
K_1	28.700	30.786	24.587
K_2	29.461	29.178	29.366
K_3	29.733	27.931	33.941
k_1	9.567	10.262	8.196
k_2	9.820	9.726	9.789
k_3	9.911	9.310	11.314
极差 R	0.344	0.952	3.118
主次顺序		3>2>1	

因此,上述的各因素对开挖影响范围 B 的影响程度排序为:基坑开挖深度 H>土体内摩擦角 φ>墙背和填土间摩擦角 δ;受基坑内部支撑体系约束,φ 对开挖影响范围 B 的贡献度大于 δ。

3 数值模拟

3.1 单层均质地层有限元数值模拟

根据安徽合肥某能源开发基地配套项目 110 kV 变电站基坑地质勘察报告提供的地质条件参

数,结合前文的计算分析方法,建立基坑三维有限元整体分析模型。综合考量工程复杂性、周边环境敏感性、数值精度与计算效率,模型尺寸及边界条件据此确定。已有研究表明[27],基坑开挖诱发的侧向土体扰动范围为(2～5)H,竖向扰动范围为(3～5)H;边界距离开挖区越远,边界效应越弱。鉴于背景工程最大开挖深度约为 13 m,模型最终取 132 m(长)×24 m(宽)×40 m(深),以兼顾计算精度与边界无关性。

本模型有网格单元 11 万个,节点 2 万个,如图 4 所示。土层采用实体单元;地连墙采用 2D 壳单元;钢支撑采用 1D 结构单元。土层采用修正摩尔-库仑本构,基本地层土体参数见表 6,地下连续墙和钢支撑的选用参数见表 7。

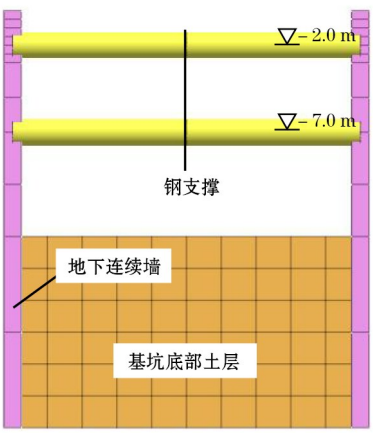


图 4 单层均质地层模型剖面图

Fig.4 Profile of single-layer homogeneous stratum model

表 6 基本地层土体参数

Table 6 Soil parameters of basic stratum

地层	厚度/m	容重/(kN/m³)	弹性模量/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
均质土体	40	18	6	20	0.28

表 7 地下连续墙及钢支撑参数的物理力学参数

Table 7 Physical and mechanical parameters of diaphragm wall and steel support parameters

结构类型	材料	截面尺寸/m	弹性模量/MPa	泊松比
地连墙	混凝土 C30	厚度 0.5	30 000	0.28
钢支撑	钢材 Q235	半径 0.4;厚度 0.016	210 000	0.27

3.2 多层均质地层有限元数值模拟

在实际工程中,基坑开挖一般涉及多层土体,本文根据各土体厚度所占基坑开挖深度比例计算相关参数的加权平均值。根据前文,本次考虑开挖基坑的最大深度约为 13 m,本模型尺寸取模型长 132 m、宽 24 m 和深 40 m。

建立基坑三维有限元整体分析模型,模型网格单元有 11 万个,节点 2 万个。土层采用实体单元;地连墙采用 2D 壳单元;钢支撑采用 1D 结构单元。多层均质地层基坑支护结构剖面图如图 5 所示,土层采用修正摩尔-库仑本构,基本土体参数见表 8,地下连续墙、钢支撑参数与前文相同(见表 7)。

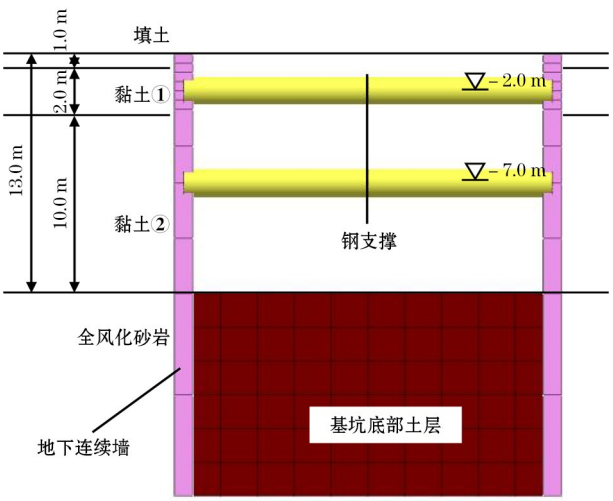


图 5 多层均质地层基坑支护结构剖面图

Fig.5 Profile of foundation pit support structure in multi-layer homogeneous stratum

表 8 土体的物理力学参数

Table 8 Physical and mechanical parameters of soil

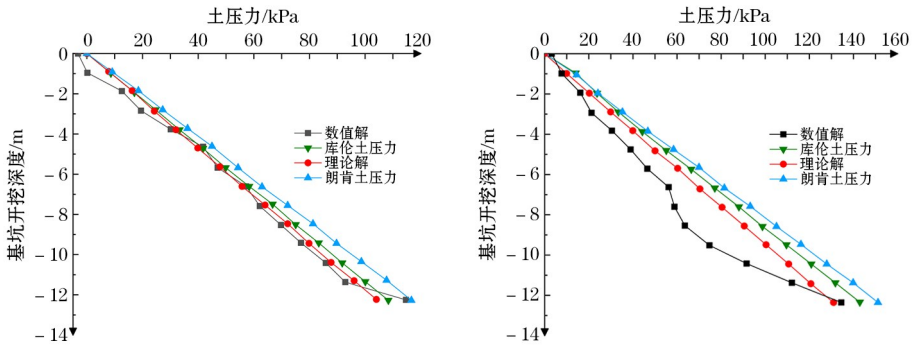
土体	厚度/m	容重/(kN/m³)	弹性模量/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
素填土	1	18.0	6	7.0	0.28
黏土①	3	19.3	15	14.0	0.28
黏土②	10	19.6	18	15.0	0.28
全风化泥质砂岩	26	19.7	18	17.2	0.30

4 计算结果与分析

4.1 单层和多层均质土体主动土压力分析

土压力随基坑开挖深度的变化曲线如图 6 所示。由图 6(a)可知,单层均质土层条件下,尽管在数值上存在差异,但土压力数值解与本文理论解沿基坑开挖深度分布趋势一致,以此来佐证本文所提计算方法的合理性。由图 6(b)可知,多层均质地层条件下,数值模拟结果显示,在基抗开挖深度 2 m 和 7 m 处,土压力出现变化是因为基抗开挖深度 2

m 和 7 m 处有钢支撑,在基坑开挖深度 0 m 和埋深 13 m 处坑顶与坑底的土压力数值解与本文理论解差异微小,整体分布趋势仍高度一致。相比于朗肯土压力和库伦土压力的计算结果,本文理论解的差距最小,这说明了本文土压力计算的合理性,可以为实际工程影响范围划分提供参考。



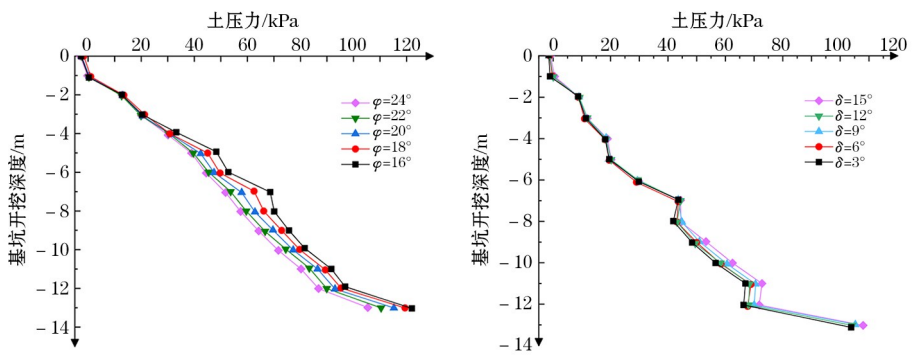
(a) 单层均质土层　　(b) 多层均质土层

图 6　土压力随基坑开挖深度的变化曲线

Fig.6　The variation curves of soil pressure with excavation depth of foundation pit

4.2　不同参数对土压力影响分析

图 7(a)为土体内摩擦角 $\varphi=16°$、18°、20°、22°和 24°情况下,三维有限元整体分析模型的主动土压力数值解沿基坑开挖深度的变化曲线。随着土体内摩擦角 φ 的增大,主动土压力逐渐减小,可见进行土体加固对降低土压力效果显著,这与前文建立坑间土压力分析模型时的假定具有较好一致性。图 7(b)为墙背和填土间的摩擦角 $\delta=3°$、6°、9°、12°和 15°情况下,三维有限元整体分析模型的主动土压力数值解沿基坑开挖深度的变化曲线。随着墙背和填土间的摩擦角 δ 的增大,主动土压力逐渐增大,这与前文理论分析有较好的一致性。



(a) 土体内摩擦角　　(b) 墙背和填土间的摩擦角

图 7　不同影响因素下土压力随基坑开挖深度的变化曲线

Fig.7　The variation curves of soil pressure with the excavation depth of foundation pit under different influencing factors

5　结论

本研究对基坑开挖下土压力及其影响范围进行了理论分析和数值模拟,得到以下 3 点结论。

(1) 采用库伦土压力的假设条件,建立无钢支撑支护条件下和有钢支撑支护条件下的土体土压力计算模型,推导了与基坑开挖深度 H、墙背和填土间的摩擦角 δ 和土体内摩擦角 φ 相关的土体土压力的计算表达式和开挖影响范围 B 的计算表达式。

(2) 通过开挖影响范围的影响因素敏感性分析发现,无钢支撑支护条件下开挖影响范围 B 的影响程度顺序为:基坑开挖深度 H>墙背和填土间的摩擦角 δ>土体内摩擦角 φ;有钢支撑支护条件下开挖影响范围 B 的影响程度顺序为:基坑开挖深度 H>土体内摩擦角 φ>墙背和填土间的摩擦角 δ。

(3) 由数值模拟结果可知,土压力数值解与本文理论解在分布上吻合性较好,相比于朗肯土压力和库伦土压力的计算结果,本文理论解的差距最小,这说明了本文土压力计算的合理性,可以为实际工程影响范围划分提供参考。

参考文献(References):

[1] 曾国华,汤志立.城市地下空间一体化发展的内涵、路径及建议[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):701-713+778.
Zeng Guohua, Tang Zhili. Connotation, path and suggestion of integrated development of urban underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022,18(3):701-713+778.

[2] 王寿生.地下空间发展历程与新思维[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):733-742.
Wang Shousheng. Process and brainstorming in underground space [J]. Chinese Journal of Underground Space development,2022,18(3):733-742.

[3] 陈页开,汪益敏,徐日庆,等.刚性挡土墙被动土压力数值分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):980-988.
Chen Yekai, Wang Yimin, Xu Riqing, et al. Numerical analyses of passive earth pressure on rigid retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(6):980-988.

[4] 卢国胜.考虑位移的土压力计算方法[J].岩土力学,2004,25(4):586-589.
Lu Guosheng. A calculation method of earth pressure considering displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(4):586-589.

[5] 殷德顺,王保田,李向凤.土压力-位移关系的应力路径试验研究[J].岩土力学,2008,29(10):2769-2774.
Yin Deshun, Wang Baotian, Li Xiangfeng. Research on relation between soil pressure and displacement by tests of stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2769-2774.

[6] 赵明华,李文,张锐.考虑桩-土相互作用的悬臂式排桩内力计算方法研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(1):1-7.
Zhao Minghua, Li Wen, Zhang Rui. Research on the internal forces calculation of cantilever piles considering pile-soil interaction[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2014,41(1):1-7.

[7] 杨明辉,吴志勇,赵明华.挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(3):19-27.
Yang Minghui, Wu Zhiyong, Zhao Minghua. Soil arch effect analysis and earth pressure calculating method for finite width soil behind retaining wall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(3):19-27.

[8] 徐日庆,徐叶斌,程康,等.有限土体下考虑土拱效应的非极限主动土压力解[J].岩土工程学报,2020,42(2):362-371.
Xu Riqing, Xu Yebin, Cheng Kang, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under nonlimit state of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(2):362-371.

[9] Cao Weiguo, Zhang Huijie, Liu Tao, et al. Analytical solution for the active earth pressure of cohesionless soil behind an inclined retaining wall based on the curved thin-layer element method[J].Computers and Geotechnics,2020, 128:103851.

[10] Chen Jianxu, Zhang Jinliang. Study on non-limit active earth pressure of finite soil under T mode [J]. Earth and Environmental Science,2020,531(1):012041.

[11] 王闫超,晏鄂川,陆文博,等.无黏性有限土体主动土压力解析解[J].岩土力学,2016,37(9):2513-2520.
Wang Yanchao, Yan Echuan, Lu Wenbo, et al. Analytical solution of active earth pressure for limited cohesionless soils [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(9):2513-2520.

[12] Hu Weidong, Liu Kangxing, Zhu Xinnian, et al. Active earth pressure against rigid retaining walls for finite soils in sloping condition considering shear stress and soil arching effect[J]. Advances in Civil Engineering,2020:6791301.

[13] 高幸,王维玉,丁继辉.基于嵌固稳定安全系数的悬臂结构优化设计[J].工程力学,2020,37(增刊1):62-71.
Gao Xing, Wang Weiyu, Ding Jihui. Optimization design of cantilever structure based on embedded stability safety factor[J]. Engineering Mechanics,2020,37(Suppl.1):62-71.

[14] 应宏伟,王小刚,张金红.考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J].工程力学,2018,35(5):127-133.
Ying Hongwei, Wang Xiaogang, Zhang Jinhong. Analysis on heave-resistant stability considering the effect of excavation width[J]. Engineering Mechanics,2018,35(5): 127-133.

[15] Miao Xiaoyan, Chen Changfu, Wang Siyi. Upper bound of seismic active earth pressure on gravity retaining wall with limited backfill width [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 12(1): 36-43.

[16] 李志浩,肖世国.地震条件下悬臂式挡墙主动土压力的极限分析方法[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):79-87.
Li Zhihao, Xiao Shiguo. Limit analysis method of active earth pressure on cantilever retaining wall subjected to earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2020,31(5):79-87.

[17] Xu Peng, Hatami Kianoosh, Jiang Guanlu. Seismic rotational stability analysis of reinforced soil retaining walls [J]. Computers and Geotechnics,2020,118:103297.

[18] Yang Xianliang, Zhang Sheng. Seismic active earth pressure for soils with tension cracks[J]. International Journal of Geomechanics,2019,19(6):6019009.

[19] Huang Da, Liu Jie. Upper-bound limit analysis on seismic rotational stability of retaining wall[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2016,20:2664-2669.

[20] Liu Jie, Li Xiaoguang. Upper-bound limit analysis on seismic rotational stability of waterfront retaining walls[J]. Marine Georesources and Geotechnology,2021,40:554-562.

[21] 张常光,单冶鹏,高本贤.考虑挡墙位移的土压力数学拟合新方法研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10): 2124-2135.

Zhang Changguang, Shan Yepeng, Gao Benxian. A new mathematical fitting formulation of earth pressure considering the displacement of retaining walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(10):2124-2135.

[22] 赖丰文,刘松玉,杨大禹,等.有限宽度填土挡墙主动土压力的普适解法[J].岩土工程学报,2022,44(3):483-491.
Lai Fengwen, Liu Songyu, Yang Dayu, et al. Generalized solution to active earth pressure exerted onto retaining wall with narrow backfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(3):483-491.

[23] 顾慰慈.挡土墙土压力计算手册[M].北京:中国建材工业出版社,2001.
Gu Weici. Calculation of earth pressure on retaining wall [M]. Beijing: China Building Materials Press,2001.

[24] 陈小雨,袁静,胡敏云,等.相邻深大基坑安全距离理论分析与数值模拟[J].地下空间与工程学报,2019,15(5):1557-1564+1572.
Chen Xiaoyu, Yuan Jing, Hu Minyun, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of safe distance of adjacent deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(5):1557-1564+1572.

[25] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Liu Guobin, Wang Weidong. Excavation engineering manual [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2009.

[26] 曹洋,崔洋,曹文欣.基坑开挖下邻近盾构隧道结构位移场变化研究[J].北方交通,2023(8):82-85+90.
Cao Yang, Cui Yang, Cao Wenxin. Research on the displacement field changes of adjacent shield tunnel structures under excavation of foundation pits[J]. Northern Communications,2023(8):82-85+90.

[27] 陈玉良,李丹,庞建国,等.深基坑施工对邻近南京长江大桥引桥桥墩的影响分析及围护结构设计优化[J/OL].施工技术(中英文):1-6[2025-09-15].https://link.cnki.net/urlid/10.1768.TU.20231219.1617.004.
Chen Yuliang, Li Dan, Pang Jianguo, et al. Analysis of the influence of deep foundation excavation on the approach bridge pier of Nanjing Yangtze River Bridge and design optimization of the enclosure structure[J/OL]. Construction Technology: 1-6[2025-09-15]. https://link.cnki.net/urlid/10.1768.TU.20231219.1617.004.