

基坑复合土钉支护稳定性影响因素敏感性研究

李 爽¹, 孙洪军¹, 唐家琦²

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²锦州水务(集团)有限公司, 辽宁 锦州

收稿日期: 2024年12月22日; 录用日期: 2025年1月13日; 发布日期: 2025年1月23日

摘 要

基坑开挖受多种因素影响, 容易导致支护结构破坏和基坑变形失稳。为此, 基于搅拌桩复合土钉支护结构探究基坑的稳定性, 明确复合支护结构的破坏形式, 探讨影响基坑稳定性的因素, 其稳定性主要受土层及支护结构参数影响; 现有研究在影响因素敏感性方面尚有不足, 多局限于单因素变化且控制其他因素恒定, 针对影响基坑稳定性因素的敏感性研究, 通过梳理正交试验法的基本原理和分析方法, 可为深入开展基坑影响因素敏感性分析提供借鉴和参考, 剖析不同因素对基坑稳定性的影响程度, 为优化支护结构设计提供依据。

关键词

复合支护, 基坑稳定性, 影响因素, 敏感性

Study on Sensitivity of Factors Affecting Stability of Composite Soil Nailing for Foundation Pit

Shuang Li¹, Hongjun Sun¹, Jiaqi Tang²

¹College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Jinzhou Water (Group) Company Limited, Jinzhou Liaoning

Received: Dec. 22nd, 2024; accepted: Jan. 13th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

Abstract

The excavation of foundation pit is affected by many factors, which can easily lead to the destruction of supporting structure and the deformation and instability of foundation pit. Therefore, based on

the mixed pile composite soil nailing support structure, the stability of the foundation pit is explored, the failure form of the composite support structure is defined, and the factors affecting the stability of the foundation pit are discussed. There are still deficiencies in the sensitivity of influencing factors in the existing research, which are mostly limited to the change of a single factor and the constant control of other factors. Aiming at the sensitivity research of factors affecting the stability of foundation pit, this paper combs the basic principle and analysis method of orthogonal test method, which can provide a reference for in-depth analysis of the sensitivity analysis of influencing factors of foundation pit and analyzes the influence degree of different factors on the stability of foundation pit. It provides the basis for optimizing the design of supporting structure.

Keywords

Composite Support, Foundation Pit Stability, Influencing Factors, Sensibility

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加速,城市建设中的高层建筑、地下商场、地铁等大型基础设施项目,往往需要进行大规模的基坑开挖作业,以满足地下结构的施工需求。在城市中心区或靠近既有建筑物、地下管线等对变形敏感的区域,此类基坑对安全性、稳定性及变形性控制要求更为严格。由于基坑开挖过程中受到多种因素影响,往往存在主动土压力大、被动区阻力小、支护结构变形大[1],易引起地表沉降、整体失稳、相邻建筑物损坏等问题[2],基坑工程出现明显变形和失稳破坏,严重影响工程安全[3]。为了有效控制基坑变形,确保基坑工程的安全进行,提出了搅拌桩复合土钉支护结构研究基坑的稳定性,保证在复杂条件下有效地完成基坑支护工作。由于基坑稳定性涉及多种支护结构和土体之间的相互作用,应考虑支护结构以及土层参数等因素对基坑稳定性的影响。然而,在实际工程中,因素的取值存在着不确定性,不同因素变化对基坑稳定性的影响程度也不尽相同。以往的研究都是仅考虑一种因素的变化,控制其他因素不变的情况,没有充分考虑因素间的相互作用,无法准确评估各因素对于指标的影响程度。

基于搅拌桩复合土钉支护结构,根据复合结构的破坏形式预测导致基坑失稳的影响因素,通过总结归纳正交试验法的基本原理和分析方法,有助于深入研究基坑稳定性影响因素敏感性分析,探究不同因素对基坑稳定性的影响程度,有利于进一步优化支护结构设计,推动基坑稳定性的研究和发展。

2. 搅拌桩复合土钉支护结构稳定性研究

土钉支护技术最早主要应用于岩层隧道施工,其在土层中的应用还相对较少。随着工程实践的深入,土钉支护逐渐在基坑工程中得以应用和发展。对于地下水较低的、自承性能较好的土层、基础设施所包围的城市地区深基坑[4],土钉支护具有较强的适用性。但在软土地区,土体存在抗剪强度低[5][6]、粘结性差、易流变等缺陷。水泥土搅拌桩可以形成较高抗渗性的加固体,起到止水帷幕的作用[7],并且具有较强的承载能力,减少位移和沉降[8];土钉则通过对原位土体进行加固[9],与土体接触产生摩擦力可以约束土体变形。因此,搅拌桩复合土钉支护结构以其独特的优势,较好地解决了水丰土软、土体自承能力差等问题,改善了地基土的承载能力[10],成为解决复杂地质条件和特定工程需求的关键方案。

通过对搅拌桩复合土钉支护结构的破坏形式进行展开,根据支护结构发生的破坏分析引起基坑失稳的破坏形式,对影响基坑稳定性的支护参数进行研究。

2.1. 搅拌桩复合土钉支护结构破坏形式

通过归纳搅拌桩复合土钉支护的破坏类型,明确破坏形式有助于设计出更加安全可靠的复合土钉支护方案。在设计阶段,根据可能出现的破坏形式,合理确定稳定性影响因素,提高支护结构的整体稳定性。根据实际工程经验将搅拌桩复合土钉支护结构的破坏形式大致分为以下三种:桩体破坏、内部破坏、外部破坏。

2.1.1. 搅拌桩破坏

基坑开挖后,连续的搅拌桩形成的桩墙会承受非开挖侧土体所带来的侧向土压力,主要发生弯曲破坏和剪切破坏[11]。当搅拌桩加固边坡时,边坡土体塑性区域逐步增加,搅拌桩在滑坡推力的影响下,由于与土体的变形协调性不佳,导致桩体与土体间产生塑性滑移。具有较高强度和刚度的水泥土搅拌桩,在这种作用下会发生挠曲变形,最终导致桩体发生弯曲破坏[12]。随着开挖深度增加,桩侧变形和弯矩显著增加[13],搅拌桩墙承受侧向土压力的增大[14],桩身被动土压力急剧减小,土压力不平衡发生不均匀变形[15],导致搅拌桩与土体之间发生相对滑移,搅拌桩与土体的接触面产生剪切力,当搅拌桩墙承受的剪切力超过极限值,水泥土搅拌桩被剪切破坏。

搅拌桩既是止水帷幕又有嵌固深度,当嵌固深度不足将引发桩体破坏,在侧向土压力作用下,搅拌桩可能无法提供足够的抗滑力,桩身强度不足会导致基坑整体滑移失稳和基底隆起破坏,因此搅拌桩要有足够的入土深度。

2.1.2. 内部稳定性破坏

在土体发生破坏时,若破坏面经过结构所发挥作用区域内的土体,被称为体内失稳破坏[16],如图1所示。当土钉长度不足,无法给土体提供足够的阻力抵抗土压力所引起的拉力时[17],随着拉力的持续增加,土钉与土体接触的区域发生屈服,土钉的抗拔承载力达到了极限,将从土体中被拔出,导致拉拔破坏的发生。当土钉长度过长,在边坡失稳前土钉就会被拉断[18]。在基坑开挖过程中,土体的局部稳定性变差,土体变形产生较大拉力,土钉所承受的拉力超过其极限抗拉强度时,土钉也会被拉断。

土钉抗拉强度不足或土钉与土体颗粒的粘结力不够,在基坑开挖过程中土钉都会被拉断或拔出,周围土体失去了有效的加固作用,边坡土体的抗滑力大大降低,在自身重力和侧向土压力的作用下,土体会向基坑内发生局部垮塌,造成边坡整体滑动,由于边坡土体的变形,坑顶地面还会出现沉降现象,地表产生裂缝。

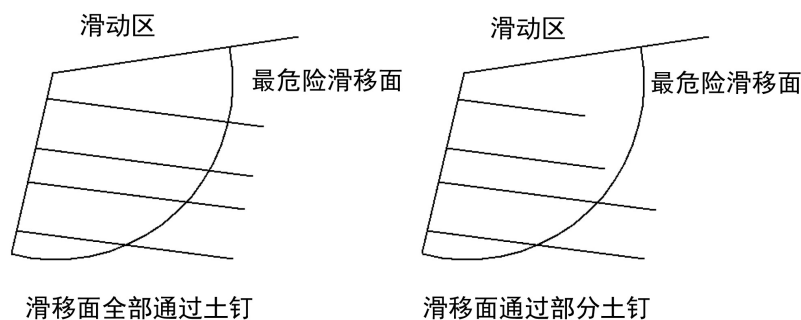


Figure 1. In Vivo instability failure
图 1. 体内失稳破坏

2.1.3. 外部稳定性破坏

土钉搅拌桩支护与原位土共同构成一个在土钉结构作用范围内具有整体作用的复合体,复合体强度、

刚度显著增加,提高了地基土承载力,其工作原理与重力式挡土墙类似[19]。因此,整个复合结构可被当作刚性体,会产生如下几种失稳形式,详见图2:所有土钉均位于滑移面以外,当支护结构无法抵抗土体的侧向压力时,整个基坑边坡或支护结构发生滑动破坏;复合土钉支护结构两侧土压力不平衡,导致结构向一侧倾斜甚至倒塌发生倾覆破坏;由于开挖引起的荷载不平衡[20],改变了土钉与土体之间的作用力,地基土承载力不足,将导致支护结构底部失去支撑,搅拌桩弯曲[21],复合体遭到挤压而产生滑挤破坏。

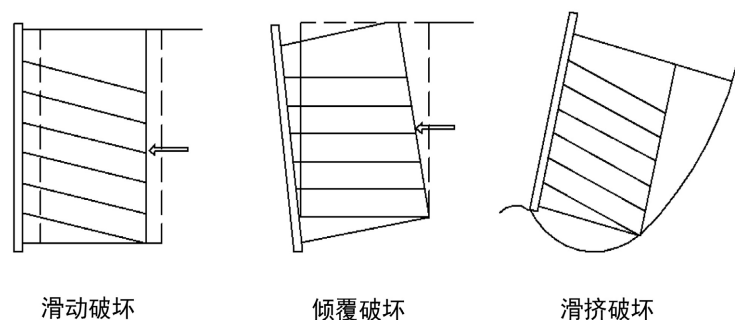


Figure 2. *In Vitro* instability failure
图2. 体外失稳破坏

2.2. 稳定性影响因素

搅拌桩复合土钉支护的稳定性受到土体性质、支护参数、施工工艺和外部因素等多方面的影响。对其中的影响支护结构以及基坑稳定性的主要因素进行分析,准确地评估基坑在搅拌桩复合土钉支护下所面临的稳定性风险,有助于在工程设计和施工前进行充分的风险预判。

2.2.1. 土体物理力学参数

土体的重度会影响基坑的侧向土压力,改变支护结构的受力情况和稳定性。重度越大,侧向土压力越大,较大的侧向土压力会增加搅拌桩和土钉的受力,导致支护结构的变形和失稳。内摩擦角和粘聚力是影响基坑开挖和整体稳定性的关键参数[22]。较高的内摩擦角可以减少滑移面的发生,更好地抵抗土体的滑动和变形。粘聚力则能增加土体的整体性和稳定性,减少基坑的变形和滑移[23][24]。弹性模量和泊松比对土体的变形特征有影响[25]。弹性模量反映土体在弹性范围内对变形的抵抗能力,可以明显影响基坑墙最大水平位移[26]。低弹性模量的土体容易发生较大的变形,在受到外力后,恢复能力较弱,可能会长期处于变形状态,不利于支护结构的稳定性。泊松比越大,土体在受压时的横向变形越大,但当泊松比过高则会增加基坑的水平位移。场地渗流会改变支护结构所受土压力[27],渗透性较高的土体容易产生渗流,降低非饱和土体的内吸力,增加基坑的侧向土压力,导致支护结构的失稳。

2.2.2. 搅拌桩支护参数

搅拌桩的桩径会改变土体的加固范围和承载能力。如果桩径小于设计值,土体的加固范围减小,承载能力降低,支护结构的稳定性也会相应下降。较大的桩径可以增加抗剪截面受力面,减少桩体的变形和沉降[28],增强桩体的抗剪和承载能力。桩间距对支护的整体稳定性有影响。较小的桩间距可以形成一个更为紧密的支护体系,增强整体稳定性。但当桩间距过小时,桩土的应力比将会偏大[29],桩体竖向变形变大;搅拌桩桩身嵌入深度的增加,可以为支护结构提供更稳固的锚固基础,产生较大的抵抗力矩。在基坑受到侧向土压力时,桩身与土体之间产生摩擦力,阻止支护结构沿坑底平面产生滑移。在基坑开挖过程中,坑底土体由于卸荷,土压力释放,基坑内侧会产生坑底隆起[30]。足够深的搅拌桩可以通过自身的刚度和与土体的协同作用,限制坑底土体的向上位移,抵抗坑底部土体的隆起。

2.2.3. 土钉支护参数

土钉抗拉强度不足或土钉与土体颗粒的粘结力不足时,基坑会发生局部垮塌、边坡整体滑动、坑顶地面沉降、地表产生裂缝等破坏。当土钉长度小于设计要求时,土钉的锚固深度不足,无法提供足够的抗拔力抵抗土体的侧压力,土体容易发生较大的变形和位移。增加土钉的长度能够更深入地锚固到稳定的土层中,有效减少基坑边坡坡顶的水平位移[31],从而提供更大的抗滑力和抗拉力。土钉横向间距设计不合理,支护结构的抗滑力不能平衡下滑力时,就会引发严重的整体滑动破坏,基坑边坡整体垮塌。当土钉横向间距过大时,土钉对土体的加固作用减弱,相邻土钉之间的土体容易产生局部的剪切破坏,这种局部失稳逐渐发展形成小范围的土体剥落或坍塌,基坑边坡局部凹陷。土钉横向间距超过一定限值时,间距增加会降低基坑边坡的稳定性安全系数[32],显著影响边坡顶部的变形,使基坑边坡坡顶的水平位移和沉降增大,且其增幅随基坑开挖深度的增大而显著增加[33]。

3. 基坑稳定性影响因素敏感性研究

参数的不确定性会对基坑工程及其稳定性产生重大影响,不确定性因素的存在将大大降低分析和评价的可靠性,其中敏感性分析是不确定性研究中常用的方法[34]。敏感性分析是一种研究和评估模型输出对输入变量变化的敏感程度的分析方法,主要用于确定输入因素对输出结果的影响程度。一般借助灰色关联分析法、正交试验设计法、层次分析法、向量相似度法、模糊综合评价法等多个影响因素进行显著性分析,以此确定不同影响因素的敏感程度,有助于更好地理解基坑稳定条件[35]-[37]。

3.1. 敏感性分析研究现状

研究者们基于层次分析法、灰色关联法以及模糊数学理论等数学方法进行研究,得到了更多改进的数学分析方法。邓聚龙教授首次提出灰色系统理论[38],建立了灰色关联分析模型。张旭等人运用灰色关联分析法分析了边坡稳定性的变化规律,对影响基坑开挖的主要因素进行敏感性分析。结果表明,不同的影响因素对影响边坡的稳定性程度不同[39]。但灰色关联法主要基于数据序列的几何形状相似性来判断关联程度,缺乏严格的概率统计意义。闫威[40]将层次分析法与灰色关联法进行结合,改进了灰色关联模型;考虑支护结构、施工及环境影响等因素的基础上,通过层次分析法确定各因素权值,采用灰色分析法对支护方法进行决策分析[41]。由于参数单因素敏感性分析方法具有一定的局限性,鉴于此,黄书岭[42]等人提出对单因素方法评价结果的片面性进行改进,考虑多个影响因素,何满潮[43]通过研究人工神经网络的非线性映射函数,建立了深基坑支护与影响因素之间的关联,并研究解决了深基坑非线性的变形情况,形成了优选深基坑支护方案的网络模型。为了有效解决参数的复杂性和不确定性问题,刘忠会[44]等人提出将神经网络结合数值模拟、遗传算法分析变形参数的敏感性。

正交试验法是研究多变量、多层次因素行为的常用方法。这种统计分析方法在评价各种因素对试验指标影响的试验设计中被证明是一种高效、快速、经济的试验设计方法[45][46]。一些学者基于正交试验对影响基坑边坡稳定性参数因素进行了研究:考虑基坑边坡的土体参数和坡面结构作为影响因素,侯文萃[47]以正交试验为基础,采用基于灰色关联法的改进正交试验设计法,选取6种影响因素进行敏感性分析,李英华[48]等人将正交试验设计和极差、方差分析相结合,考虑了因素间的交互作用影响。正交试验设计还可以研究支护结构设计参数对基坑不同稳定性指标的敏感性,对于深基坑工程的主体结构采用地下连续墙+内支撑方式的支护结构,何忠明[49]选取地下连续墙厚度、嵌固深度、支撑刚度作为影响因素设计正交试验,研究对基坑及邻近地铁隧道稳定性的影响程度;樊云龙[50]为研究桩撑式支护结构坑中坑段地铁车站基坑开挖变形特性,基于正交试验分析支护桩和内支撑支护影响因素敏感性程度,为基坑工程支护结构设计和参数优化提供一定的理论依据和参考。除此之外,正交试验法也可以结合数值模拟

被广泛应用在其他因素对基坑不同指标敏感性的研究中。张恩祥等[51]依托实际基坑工程,运用 ABAQUS 建立了基坑数值模型进行数值模拟计算,研究了桩间距与桩径的比值对支护结构的影响,基于数值模拟计算结果设计正交试验,分析了各个支护参数对支护结构内力与变形敏感性的影响,王刚[52]通过 FLAC3D 建立计算模型,用于计算正交试验设计中的试验控制指标,考虑土层参数及基坑结构分析不同设计参数对基坑变形与稳定性的敏感程度。

上述研究成果展示了敏感性分析在研究各因素变化与评价指标之间关系的成熟运用,影响因素敏感性分析能够从众多不确定因素中提取出对评价指标有重要影响的敏感因素[53],通过揭示各因素复杂的相互作用机制,可以明确不同因素对基坑稳定性的影响程度,进而分析出基坑失稳的原因,从而采取相应措施降低基坑失稳风险。因此,对影响稳定性的因素进行敏感性分析,对于弄清基坑失稳机理,优化设计方案具有重要意义。

3.2. 正交试验法

3.2.1. 基本原理

正交试验法是根据归一化正交表选择对研究性质影响较大的因素的代表性水平。通过了解各种因素的重要性以及它们之间的相互作用,该方法的主要优点是减少了所需的测试数量,但仍然提供了最佳水平的因素组合。基于正交性,从综合测试变量中选取具有代表性的测试点样本。这些有代表性的测试点通常是均匀分散的,具有可比性[54]。

为了便于介绍正交试验设计的原理与优点,分别用全面试验法和正交试验法分析一个含有三因素三水平试验的试验组合数。实施一次三因素三水平的全面试验,试验的组合方案有 3^3 种,即需要进行 27 次试验。如图 3 的立方体示意,立方体包含的 27 个节点代表 27 次试验。而正交试验法则是从全面试验中选取有代表的试验点来安排试验,借助正交试验表,可以很好地挑选代表性强的试验点。在 3 因素 3 水平的情况下正交试验只需试验 9 次,试验点分布如图 4 所示,立方体 9 个点假设为正交试验点,均衡分布在整个立方体内,具有较强的代表性,可较全面的反映因素和水平之间的基本情况,有利于提高效率。

在进行多因素水平分析时,与全面试验相比,正交试验法大大减少了试验次数,提高了效率。同时,它能够有效地分析因素的主效应和部分交互效应,对试验进行整体设计、综合比较、统计分析,提供最佳因素组合试验方案[55][56]。

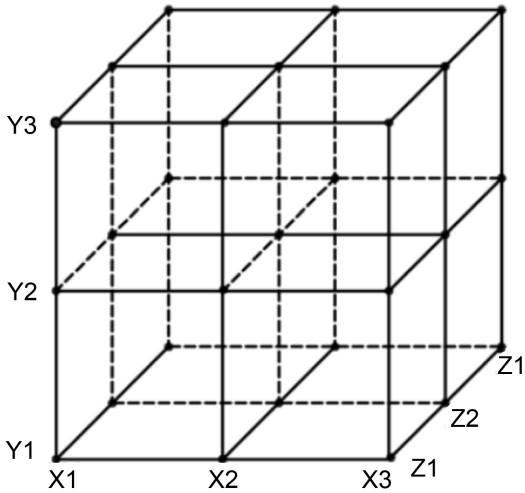


Figure 3. Comprehensive test point distribution
图 3. 全面试验点分布

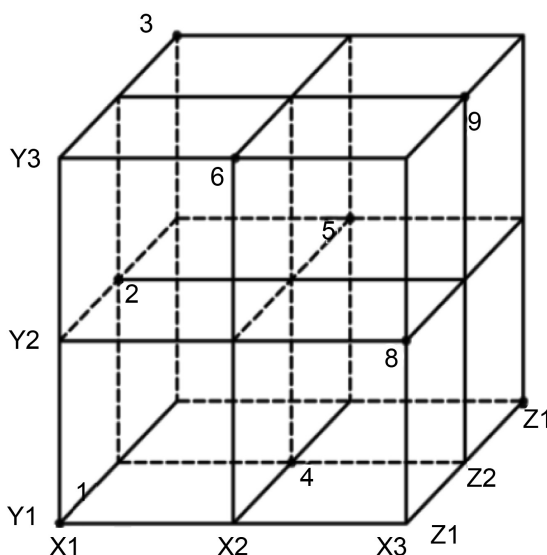


Figure 4. Orthogonal test point distribution

图 4. 正交试验点分布

在基坑支护过程中，支护参数作为基坑稳定性的影响因素，它的复杂性和差异性可能会对基坑支护结构的变形稳定产生不同程度的影响[57]。因此，为了探究各影响因素对基坑稳定变形的影响程度，有必要对其进行敏感性分析。

3.2.2. 正交试验结果分析方法

1) 极差分析法

极差是同一因素不同水平下平均值的最大值与最小值之差[58]，通过各因素极差的大小来判断其对试验结果影响的程度，极差越大，说明该因素对试验结果的影响越大，进而能确定各因素影响试验结果的主次顺序。此方法简单直观、便于操作，可快速对正交试验结果进行初步分析，但无法估计试验误差，也难以确定分析结果的精确程度。

2) 方差分析法

方差分析可以将试验数据分解为各个因素的主效应、因素之间的交互效应以及误差效应等部分，可以找到导致试验结果差异的误差来源，弥补了极差分析法的缺点，从而评估每个因素对试验指标的影响是否显著[59]。通过计算各因素的离差平方和、自由度、均方等统计量，并与误差项的相应统计量进行比较，来确定因素的主次顺序和最优水平组合。

4. 结语

搅拌桩复合土钉支护结构的不同破坏形式会引起不同程度的基坑失稳，为了确保基坑的稳定性首先应对支护结构发生的破坏展开分析，对于该复合支护结构的桩体破坏通常会引起基坑整体滑移失稳和基底隆起破坏，内部破坏会导致土钉的拉拔或拉断破坏，造成基坑内部局部垮塌及地表沉降，外部破坏则会导致支护结构整体发生破坏。基坑的稳定性也会受多方面因素影响，不仅要考虑支护结构的设计参数，还应该将土体的物理力学参数考虑在内，其中支护参数的改变会直接影响土体加固范围、支护结构承载和变形能力。针对基坑稳定性影响因素的敏感性研究，在实际的科学研究和工程实践中，往往需要同时考察多个因素对某个试验指标的影响，而正交试验设计法是一种基于数理统计的数学方法，用于多因素试验的高效设计与分析，能够在较少的试验次数下，获得关于各因素主效应和部分交互效应的较为全面

和准确的信息,从而为多因素系统的优化和决策提供科学依据。

目前研究基坑稳定性影响因素的敏感性虽然取得了进展,但仍存在一些不足,基于搅拌桩复合土钉支护结构下的稳定性影响因素的显著性方面,还需要进一步分析各个因素对基坑稳定性的影响程度以及显著性,由于数值模拟技术在工程领域的广泛应用,可以考虑在建立数值模型的基础上,结合正交试验法,考虑多种因素间的相互作用,研究稳定性影响因素的敏感程度,有助于优化设计参数,准确评估支护及基坑失稳的风险,提高实际工程的安全性和可靠性。

基金项目

2024 年辽宁省科技计划联合计划(技术攻关计划项目),2022 年辽宁省研究生联合培养示范基地项目(YJD202204)。

参考文献

- [1] Zang, M., Peng, Q. and Wang, C. (2024) Analysis of Foundation Pit Support Selection and Design Problems in Deep Soft Soil Area. *Advances in Civil Engineering*, **2024**, Article 2779898. <https://doi.org/10.1155/2024/2779898>
- [2] Korff, M., Mair, R.J. and Van Tol, F.A.F. (2016) Pile-Soil Interaction and Settlement Effects Induced by Deep Excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **142**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001434](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001434)
- [3] Chen, D., Wang, Z., Jiang, K., Yu, F., Su, J. and Ai, X. (2024) Study on the Coupling Effect and Construction Deformation Control of Large Deep Foundation Pit Groups Involving Iron Considering the Coupling Effect of Seepage Stress. *Thermal Science and Engineering Progress*, **54**, Article 102780. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102780>
- [4] Zolqadr, E., Yasrobi, S.S. and Norouz Olyaei, M. (2015) Analysis of Soil Nail Walls Performance—Case Study. *Geomechanics and Geoengineering*, **11**, 1-12. <https://doi.org/10.1080/17486025.2015.1006263>
- [5] Hsieh, H.S., Huang, Y.H., Hsu, W.T., et al. (2017) On the System Stiffness of Deep Excavation in Soft Clay. *Journal of GeoEngineering*, **12**, 21-24.
- [6] Chheng, C. and Likitlersuang, S. (2018) Underground Excavation Behaviour in Bangkok Using Three-Dimensional Finite Element Method. *Computers and Geotechnics*, **95**, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.09.016>
- [7] 左伟, 叶洪东, 魏东波. 水泥土桩止水帷幕对深基坑整体稳定性的影响分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(7): 54-57.
- [8] Han, W., Li, G., Sun, Z., Luan, H., Liu, C. and Wu, X. (2020) Numerical Investigation of a Foundation Pit Supported by a Composite Soil Nailing Structure. *Symmetry*, **12**, Article 252. <https://doi.org/10.3390/sym12020252>
- [9] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
- [10] Yu, J., Chen, J., Zhou, J., Xu, J. and Gong, X. (2024) Analytical Modeling for the Behavior of Concrete-Cored Cement Mixing (CCM) Pile Composite Foundation under Embankment. *Computers and Geotechnics*, **167**, Article 106084. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106084>
- [11] 商庆坤, 裴利华, 桂跃, 等. 泥炭质土水泥土搅拌桩复合地基承载特性研究[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 40-47.
- [12] 许胜才, 张信贵, 马福荣, 等. 水泥土桩加固边坡变形破坏特性及模型试验分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3187-3196.
- [13] Liyanapathirana, D.S. and Nishanthan, R. (2016) Influence of Deep Excavation Induced Ground Movements on Adjacent Piles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **52**, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.019>
- [14] 郑刚, 夏博洋, 周海祚, 等. 桩体模量对水泥土搅拌桩复合地基破坏影响研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 146-154.
- [15] 张松, 余再西, 刘克明. 某软土基坑复合土钉墙支护结构失稳分析与加固处理[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2419-2422.
- [16] 赵玉军. 水泥土搅拌桩复合土钉支护稳定性分析[J]. 农业科技与信息, 2020(4): 122-123.
- [17] 陈建梅, 孙庭富, 朱凌峰, 等. 基坑支护结构设计选型、事故的原因、预防和加固处理方法及设计中的注意事项[J]. 中华建设, 2021(8): 90-91.
- [18] 田坤, 朱鸿鹄, 张诚成. 土钉横向抗剪效应对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1744-1752.
- [19] 潘必胜. 重力式水泥土墙在连云港地区海相沉积土基坑支护中的应用[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 57-60.

- [20] Singh, V.P. and Sivakumar Babu, G.L. (2009) 2D Numerical Simulations of Soil Nail Walls. *Geotechnical and Geological Engineering*, **28**, 299-309. <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9292-x>
- [21] 付佰勇, 师启龙. 深层水泥搅拌桩承载特性研究进展分析[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(4): 29-31, 76.
- [22] Pak, A., Maleki, J., Aghakhani, N. and Yousefi, M. (2019) Numerical Investigation of Stability of Deep Excavations Supported by Soil-Nailing Method. *Geomechanics and Geoengineering*, **16**, 434-451. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1680878>
- [23] 彭方明. 地质参数对桩身受力及变形机理的影响分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(9): 137-139.
- [24] 穆青. 土层参数变化对深基坑变形影响规律研究[J]. 江西建材, 2023(12): 70-72.
- [25] 蒋远芳. 岩土体力学参数对抗滑桩变形特性的影响研究[J]. 西部交通科技, 2023(12): 102-103, 127.
- [26] Wang, Y. (2019) Study on the Influence of Soil Parameters Change on the Stability of Foundation Pit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **304**, Article 052004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052004>
- [27] 李镜培, 施曙东, 郑笠, 等. 邻近基坑开挖及渗流条件下的主动土压力模型[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 168-175.
- [28] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Yensri, P. and Jamsawang, P. (2018) Dependence of Ultimate Bearing Capacity and Failure Behavior of T-Shaped Deep Cement Mixing Piles on Enlarged Cap Shape and Pile Strength. *Computers and Geotechnics*, **97**, 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.12.013>
- [29] 李国庆, 马海春, 崔可锐, 等. 土钉支护边坡影响因素试验分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 54-60.
- [30] 章善保, 陈琛, 高子展, 等. 搅拌桩复合土钉基坑支护技术应用效果数值模拟分析[J]. 四川水泥, 2024(8): 154-156, 159.
- [31] 曹程明, 时铁磊, 龙照, 等. 考虑软弱夹层的土钉墙设计参数对基坑变形与稳定性影响分析[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(6): 85-90.
- [32] 彭永强. 论深基坑工程影响土钉墙支护稳定性的因素及对策[J]. 科学技术创新, 2022(11): 133-136.
- [33] 罗远明. 土钉墙支护基坑边坡的稳定性及影响因素分析[J]. 公路与汽运, 2021(3): 82-86.
- [34] Xu, Z., Wang, X., Guo, L. and Yu, T. (2024) Stability Evaluation of Slope Based on Global Sensitivity Analysis. *Complexity*, **2024**, Article 2333859. <https://doi.org/10.1155/2024/2333859>
- [35] Deng, L., Feng, B. and Zhang, Y. (2018) An Optimization Method for Multi-Objective and Multi-Factor Designing of a Ceramic Slurry: Combining Orthogonal Experimental Design with Artificial Neural Networks. *Ceramics International*, **44**, 15918-15923. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.010>
- [36] Hong, B., Lin, B. and Lin, J. (2017) Quantification of Residential Design Parameters' Effects on the Outdoor Wind Environment Using Orthogonal Experimental Design (OED) and Numerical Simulation. *Procedia Engineering*, **205**, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.945>
- [37] Ghadrddan, M., Shaghaghi, T. and Tolooiyan, A. (2020) Sensitivity of the Stability Assessment of a Deep Excavation to the Material Characterisations and Analysis Methods. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, **6**, Article No. 59. <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00186-6>
- [38] 邓聚龙. 灰色控制系统[J]. 华中工学院学报, 1982(3): 9-18.
- [39] Xu, Z., Zhuoying, T. (2016) Slope Excavation and Parameter Sensitivity Analysis Based on Grey Correlation Method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **21**, 4549-4558.
- [40] 闫威, 晏飞群. 基于灰色关联改进模型的深基坑支护方案优选[J]. 铁道建筑, 2014(4): 94-97.
- [41] 白建光, 张雁, 李海军. 灰色-层次分析法在基坑支护方法选取教学中的应用[J]. 高教学刊, 2021, 7(23): 113-116.
- [42] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 2624-2630.
- [43] 何满潮, 乾增珍, 汪仁和. BP 神经网络在深基坑工程支护方案优选的应用[J]. 矿业研究与开发, 2004(2): 22-23, 33.
- [44] 刘忠会, 王军祥, 李鹏. 基于 GA-ANN 的岩土体变形参数敏感度分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(7): 40-42.
- [45] Han Fen, and Li Bo, (2010) Mix Design of Wearable Cement Concrete Based on the Fuzzy Orthogonal Experiment. 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, 26-28 June 2010, 1366-1369. <https://doi.org/10.1109/mace.2010.5536258>
- [46] Fan, T.J. and Chen, H. (2012) Relationships between the Volumetric Parameters and the Marshall Index for Asphalt Mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, **174**, 947-953. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.174-177.947>

- [47] 侯文萃, 辛全才. 基于改进正交设计的黄土边坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 土工基础, 2016, 30(2): 209-213.
- [48] 李英华, 张明媛, 袁永博. 基于正交设计的基坑开挖放坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(1): 113-116, 142.
- [49] 何忠明, 王盘盘, 王利军, 等. 深基坑施工对临近地铁隧道变形影响及参数敏感性分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 63-72.
- [50] 樊云龙. 地铁车站基坑开挖变形影响因素敏感性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [51] 张恩祥, 胡涌琼, 何腊平, 等. 深基坑疏桩强锚支护结构参数敏感性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(18): 7998-8004.
- [52] 王刚, 胡立强, 孙尚渠, 等. 淤泥质软土基坑搅拌桩与土钉复合支护结构受力与变形特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4962-4969.
- [53] Kong, L., Zhang, Z., Yuan, Q., Liang, Q., Shi, Y. and Lin, J. (2018) Multi-Factor Sensitivity Analysis on the Stability of Submarine Hydrate-Bearing Slope. *China Geology*, **1**, 367-373. <https://doi.org/10.31035/cg2018051>
- [54] Zou, G., Xu, J. and Wu, C. (2017) Evaluation of Factors That Affect Rutting Resistance of Asphalt Mixes by Orthogonal Experiment Design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **10**, 282-288. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.008>
- [55] Su, L., Zhang, J., Wang, C., Zhang, Y., Li, Z., Song, Y., et al. (2016) Identifying Main Factors of Capacity Fading in Lithium Ion Cells Using Orthogonal Design of Experiments. *Applied Energy*, **163**, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.014>
- [56] Hu, C. and Zhang, X. (2019) Influence of Multiple Structural Parameters on Interior Ballistics Based on Orthogonal Test Methods. *Defence Technology*, **15**, 690-697. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.014>
- [57] 白帅. 深基坑桩锚支护有限元数值模拟分析及优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2023.
- [58] 冉涛, 毛江南, 梅松华, 等. 基于正交试验法重力锚基坑岩土参数敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 101-106, 111.
- [59] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.