

地铁基坑开挖变形特征研究

邓锦尚¹, 潘恩慕², 向伟明²

¹广东稳固检测鉴定有限公司, 广东 广州

²广州大学, 广东 广州

收稿日期: 2021年9月14日; 录用日期: 2021年9月28日; 发布日期: 2021年10月13日

摘要

本文以某滨海城市的地铁车站延长线基坑工程为背景, 通过监测数据结合数值模拟, 采用Midas GTS NX有限元软件对超长基坑进行深入研究, 分析了基坑连续墙变形过大以及基坑事故发生原因。研究了基坑在开挖过程中地面沉降主要影响区域; 找出同侧地连墙体水平位移差异的原因是深厚淤泥层是主要因素; 通过采用传统条分法与有限元极限平衡法计算结果边坡安全(稳定)的规律; 淤泥土质的边坡影响因素敏感性大小的参数; 最后通过对某基坑施工过程监测数据及数值计算验证了事故基坑土体滑塌成因是坡角过大、局部超载、土体超挖。

关键词

基坑开挖, 砂、淤泥, 对比分析, 边坡分析, 耦合分析

Study on Deformation Characteristics of Metro Foundation Pit Excavation

Jinshang Deng¹, Enmu Pan², Weiming Xiang²

¹Guangdong Wengu Testing and Identification Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: Sep. 14th, 2021; accepted: Sep. 28th, 2021; published: Oct. 13th, 2021

Abstract

Based on the foundation pit project of subway station extension line in a coastal city, this paper

文章引用: 邓锦尚, 潘恩慕, 向伟明. 地铁基坑开挖变形特征研究[J]. 土木工程, 2021, 10(10): 1013-1025.

DOI: 10.12677/hjce.2021.1010112

deeply studies the super long foundation pit by using Midas GTS NX finite element software through monitoring data and numerical simulation, and analyzes the causes of excessive deformation of diaphragm wall and foundation pit accidents. The main influence area of ground settlement during foundation pit excavation. It is found that the reason for the horizontal displacement difference of the ground connecting wall on the same side is that the deep silt layer is the main factor. The law of slope safety (stability) is calculated by using the traditional slice method and finite element limit equilibrium method. The parameters of sensitivity of influencing factors of silt soil slope. Finally, through the monitoring data and numerical calculation of a foundation pit construction process, it is verified that the causes of soil collapse of the accident foundation pit are excessive slope angle, local overload and soil overbreak.

Keywords

Foundation Pit Excavation, Sand and Silt, Comparative Analysis, Slope Analysis, Coupling Analysis

Copyright © 2021 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. 绪论

1.1. 研究背景

城市交通拥挤问题, 地铁是最佳的解决办法之一, 随着地铁基坑开挖深度不断增加, 在开挖过程中将遇到各类问题, 不同区域不同地质, 基坑建造过程引起的基坑围护结构变形、地表土体沉降、坑底隆起不尽同, 本文所研究的某市地铁基坑所在地区以淤泥、砂土土层为主。淤泥质土具备高敏感、强压缩等工程特性, 在此建地铁车站以及行车隧道难度更大、更加危险, 而且该市处在沿海地区受台风以及强降雨的影响; 加上地铁基坑的开挖犹如一条长深而窄的“沟渠”, 基坑开挖过程中地下水将会围绕基坑四周渗入, 如何保护这条“沟渠”安全稳定且不被破坏是学者当下研究的关键问题。稍有不慎, 将引发各种事故, 基坑发生稳定性事故不仅影响自身的功能, 还可能危及周边临近的道路、桥梁、管线等原有结构设施; 使得这些结构受到不同程度的损害, 严重的甚至丧失功能; 地铁基坑大多采用阶梯式明挖法, 而明挖法又涉及到边坡稳定, 研究基坑稳定我们必须注意土体开挖影响边坡的稳定, 土体发生滑坡也可能造成人员伤亡。

1.2. 研究意义

不少基坑工程事故的发生很多是由于施工管理不善造成。基坑工程的建设初期并没有一套完整的理论体系, 前人通过大量工程实践进行分析、探讨、归纳、总结出相对成熟的理论。

沿海地区深基坑支护很大程度因地质影响, 不同区域内的岩土力学特性千差万别, 同一标段工程地质也可能存在较大差异; 因而开挖引起的变形相差甚大, 如砂土、软土等所体现力学性能千差万别, 其中淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉土是软土的典型代表, 具有含水量高, 扰动性大、强度低, 存在软土层的地区各土层之间力学性能相差也大, 对地下工程建设的危害巨大, 软土地基易发生整体剪切、局部剪切或刺入破坏, 造成地面沉陷和地基失稳, 沉降过大引起支护结构开裂损坏等现象。另一方面, 由于地质构造、水文气象条件、周围房屋建筑和地下管线环境复杂、施工队伍素质等诸多因素导致深基坑支护

方案的选择出现偏差导致工程事故，雨水季节防水、降排水方面疏忽，止水帷幕作用或者做的止水帷幕不合格常造成事故，我国对于深厚淤泥和砂土条件下的基坑土体开挖研究较少，因此对于类似地区基坑的施工需要进行深入研究。

本文结合某地铁基坑开挖工程，对深基坑开挖的变形性状展开研究，通过参数化分析地连墙变形以及坑外地表沉降的规律，同时针对基坑开挖不同工况下土体边坡稳定性深入分析，得出基坑开挖过程中土体滑坡的关键原因。

1.3. 国内外研究现状

随着地下空间的开发，基坑建设建设过程表露的问题也被逐步发现，学者对复杂多变环境中基坑变形、及稳定性进行了系统的研究和分析；随着研究和实践的深入，无论是理论、设计、施工、管理以及监测等各类学科技术不断进步完善，还是工程师积累经验不断的丰富，都是使得基坑工程技术不断发展完善，形成专门的学科。

1.4. 本文主要的研究路线

1.4.1. 本课题主要研究内容

本文以某地铁车站基坑为工程背景，通过现场实际水文地质条件结合地质勘察报告及施工状况，利用 Midas GTS NX 有限元软件对基坑开挖全过程进行数值模拟，通过模拟结果与实测数据对比，验证基坑模型和参数取值的正确性，之后对基坑地下连续墙水平位移超过可控值 40 mm 的代表点进行分析，以此验证事故发生原因与基坑围护结构的关联；再通过 Midas GTS NX 软件和理正岩土边坡软件分析基坑土体开挖边坡的稳定性，找出外荷载和超挖深度引起基坑事故发生的原因？作者从以下几个方面进行研究

1) 基坑工程的开挖既要保证稳定，又要确保既有地铁结构的安全和正常运营。作者以该地铁车站基坑工程为研究对象，借助 Midas GTS NX 有限元分析软件，模拟开挖引起的基坑变形分析其变形规律。通过模拟验证基坑开挖方法及支护结构的安全性，为同类工程施工提供参考依据。

2) 通过整理该地铁车站基坑工程现场监测数据，与 Midas GTS NX 有限元分析软件得出的模拟结果对比分析，总结出基坑围护结构变形以及坑外地表沉降的一般规律。

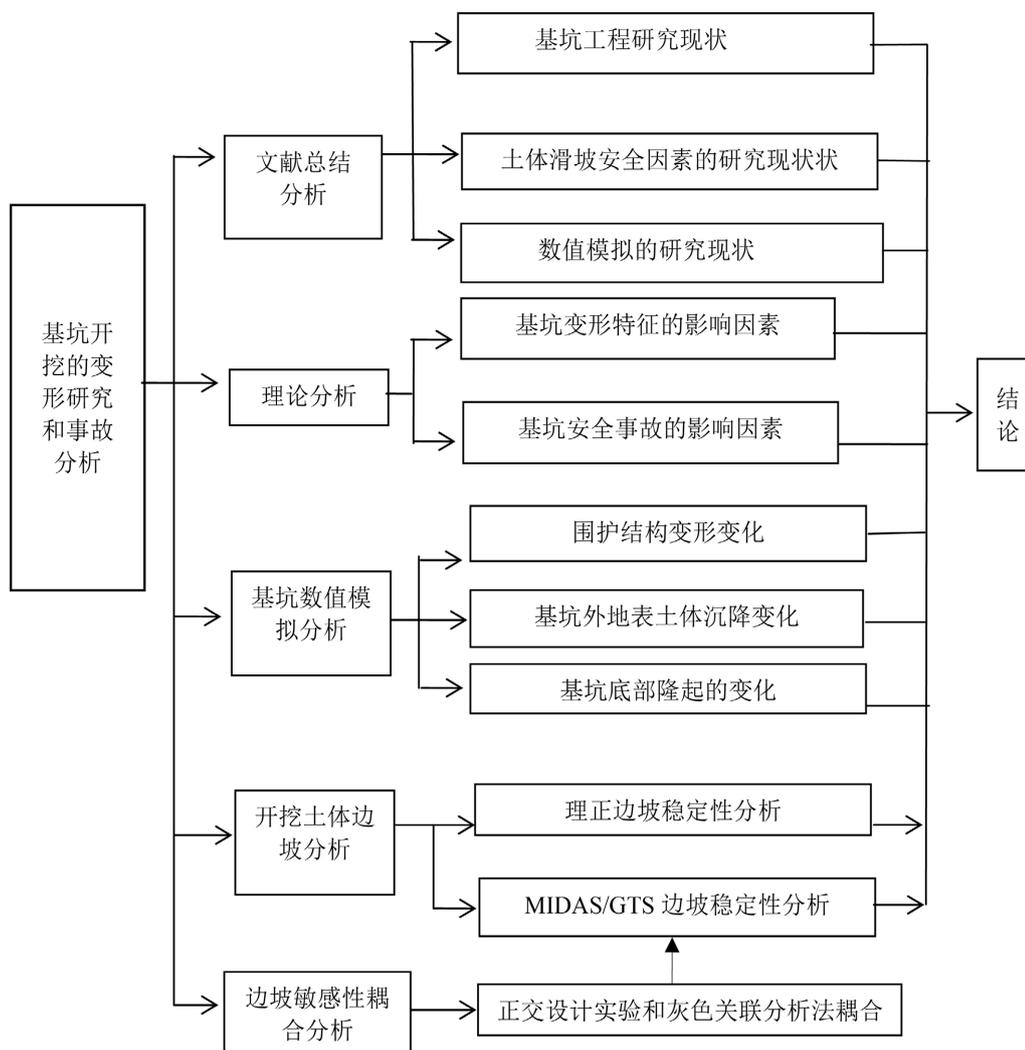
3) 通过 Midas GTS NX 建立符合实际的土体开挖的边坡模型，模拟四种不同土体超挖工况，得到这四种超挖状况下土体滑移和剪切应变，并得出四种工况下边坡的稳定性。

4) 分别采用理正岩土边坡分析软件和 Midas GTS NX 有限元分析分别对有无外荷载和四种不同超挖工况进行模拟对比，对基坑开挖边坡进行数值模拟，分析两种软件计算出的边坡安全系数，然后对比传统边坡分析法和有限元极限平衡法下分析边坡稳定的差异性，得出造成事故的原因。

5) 利用正交设计实验和灰色关联分析法耦合分析淤泥质土体边坡敏感性因素，得出各类敏感性因素对边坡稳定性的敏感程度，通过敏感程度再次对事故原因进行深入分析。

1.4.2. 技术路线

本课题以南方某海滨城市地铁 3 号线延长线车站基坑为工程背景，通过现场实际水文地质条件结合地质勘察报告及施工状况，利用专业 Midas GTS NX 有限元软件对基坑开挖全过程进行数值模拟，通过模拟结果与实测数据进行对比，验证基坑模型和参数取值的正确性，之后对基坑地下连续墙水平位移超过可控值 40 mm 的代表点进行原因分析，以此验证事故发生原因与基坑围护结构是否有关联；之后再通过 Midas GTS NX 软件和理正岩土边坡分析基坑土体开挖边坡的稳定性，得出外荷载和超挖深度是否是基坑事故发生的原因。研究路线框架如下所示：



2. 某地铁车站变形数值分析

2.1. 工程基本情况

所研究的车站主体为地下两层框架结构，采用明挖法施工，围护结构采用 800 厚地下连续墙，与车站侧墙形成复合墙结构；支护结构与主体结构之间外包柔性防水层形成二道防水防线。

2.2. 地质条件

花岗岩系场地内下伏基岩，主要矿物成份为石英、长石及黑云母等，花岗结构、块状构造。根据钻探揭露野外鉴别及标准贯入实验可分为全、强、中、微风化四个带。

2.3. 基坑施工重、难点分析及对策

2.3.1. 施工工序和整体流程

1) 施工界面划分

本站设计为地下二层岛式站台车站，主体结构长 569 m，划分为 33 个节段，每段长度 16~18 m，分为 2 个作业面从车站两端向中间施工，施工顺序见图 1。

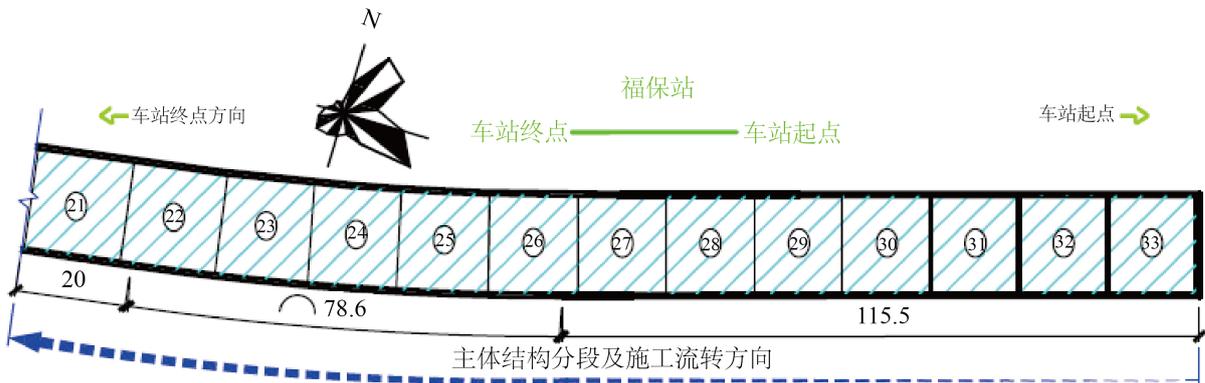
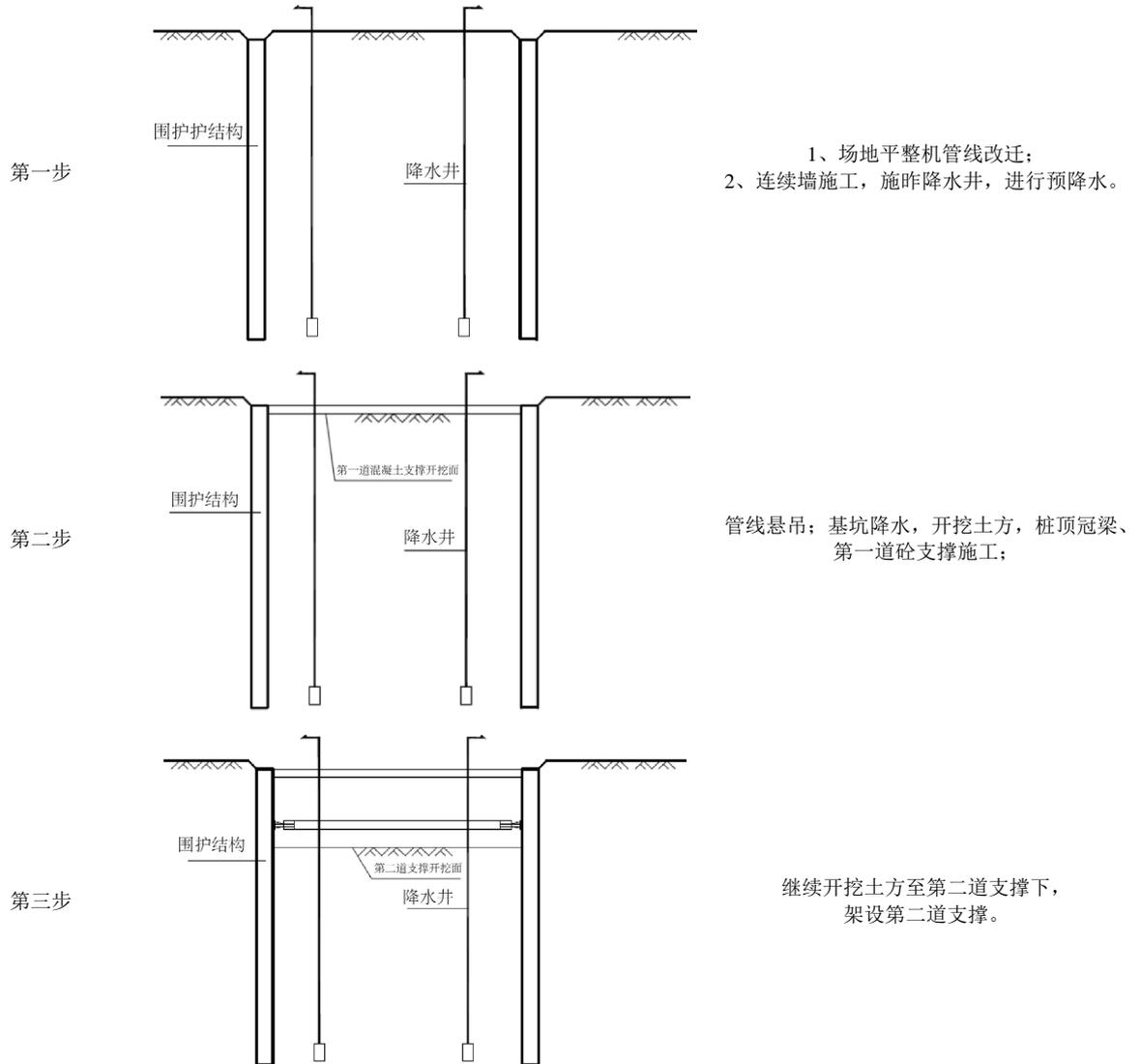


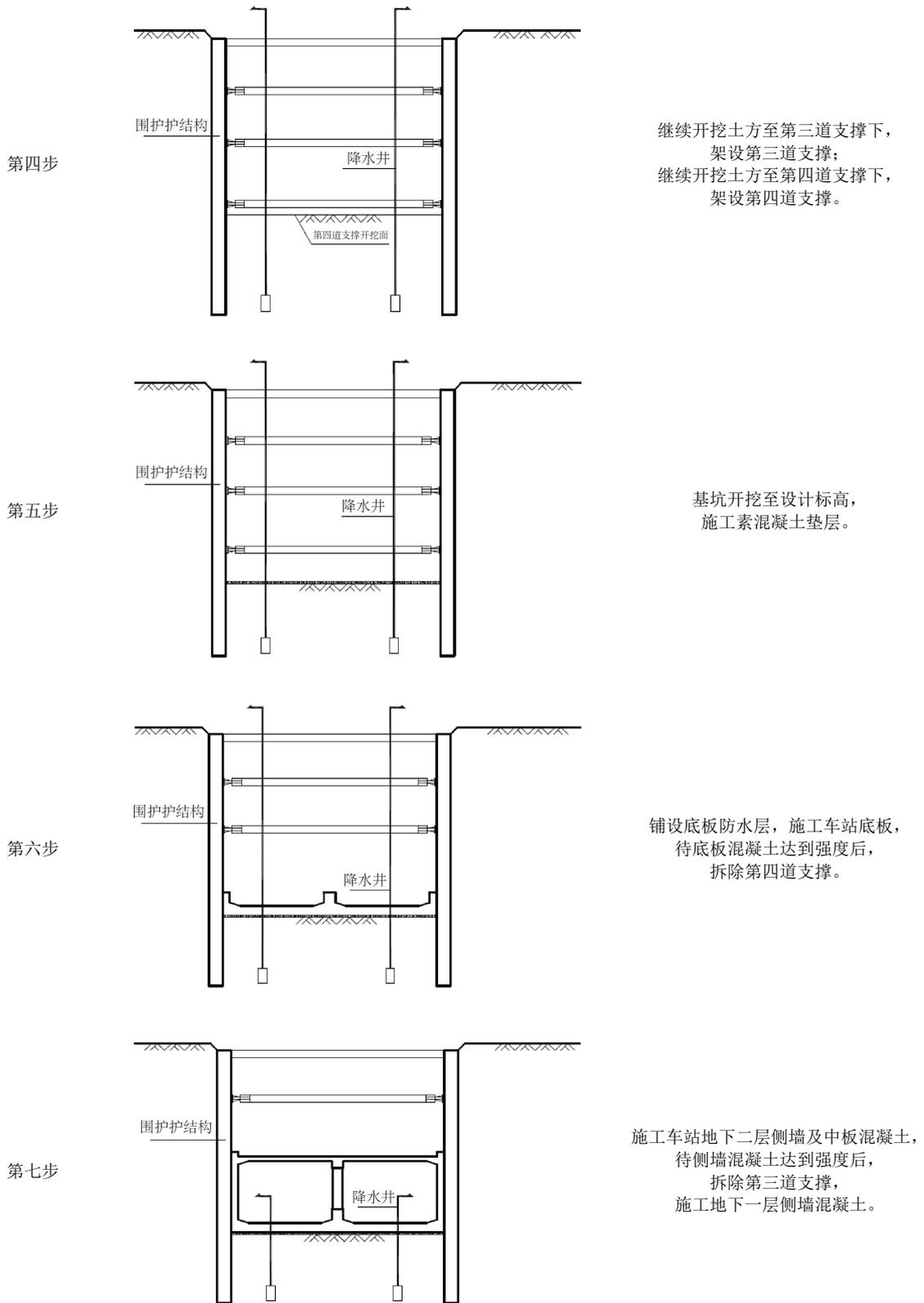
Figure 1. Section and construction sequence of main structure of station

图 1. 车站主体结构分段及施工顺序

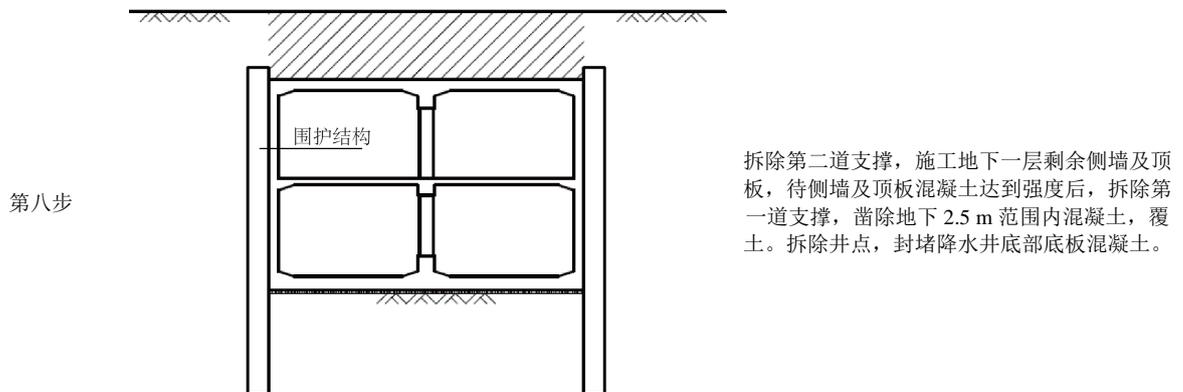
2) 施工步骤



Continued



Continued



2.3.2. 工程特点

项目所经区间下穿单身公寓(多层建筑)、高层建筑物、某屋村 43、44、82 栋多层建筑物、物流中心、仓储大厦，穿越地段地质条件复杂，施工过程中应尽量减少对既有结构的影响。采用的桩基有摩擦端承桩，直径为 $\phi 0.5\sim 0.6\text{ m}$ 的管桩及夯扩桩，桩端持力层为强风化地层；盾构推进过程中可能对桩基影响较大；车站上跨广深港客运专线高铁区间隧道，车站底板距广深港客运专线隧道最近净距为 21.7 m，穿越地段地质复杂，高速公路对隧道施工要求严格。

2.4. 基坑数值模拟

在实际工程开挖过程，影响岩土物理特性的因素很多，相应于土体开挖的方法也有多种，例如直接测定土参数的室内试验、模型试验等。作者采用 MIDAS/GTS 软件对该地铁站基坑开挖过程选取正确的岩土本构模型，将所得结果与实际情况对比，分析基坑支护的相关规律以及模型理论的适用性。

2.4.1. 模型假定

- 1) 各土层均呈现水平均匀状分布，且同土层假定为均质、等厚、各项同性的理想弹塑性体；
- 2) 基坑模拟开挖分析时，模拟工况开挖为分层开挖；
- 3) 地连墙围护结构材质假定为理想匀质弹性材料，且始终与周边土体变形协调；
- 4) 忽略基坑开挖过程中各种机械运输和机械振动等对岩土物理性能影响；
- 5) 假设土体都拥有固定的渗透系数值，这样有利于考虑降雨或地下水渗流影响；。

2.4.2. 确定基坑三维模型的尺寸

为了合理地反应工程的实际施工情况，建立全部地铁深基坑模型将更加合理地反映计算结果的可靠性，为了模型能反映工程的实际状况，应遵循以下原则[1]：

- 1) 减小基坑边界带来的影响，建立合理的边界条件；
- 2) 边界约束以及初始应力尽可能接近工程实际；
- 3) 基坑结构应选用合适的模型结构单元；
- 4) 选取的岩土和材料参数接近实际工况，能反映土体或构件的性能；
- 5) 岩层的划分假设适当合理。

通常几何模型边界距离基坑外壁不应小于 3~4 倍的开挖深度，模型的整个竖向深度应该大于基坑开挖深度的 2~4 倍[2] [3]；本文建立模型的长、宽、高分别为 778 m、224 m、50 m。

2.4.3. 基坑开挖工况

地铁车站基坑实际采用明挖法，阶梯式开挖，具体施工过程分阶段分为上百个开挖过程，本次模拟简化了基坑具体的开挖方式，以基坑开挖面作为标高零点，基坑初始水位及总水位为 -1.26 m ，模拟过程先做初始水位渗流分析，然后对应力场通过位移清零消除自重等外荷载作用下的变形影响，基坑分层开挖前，将水位降至开挖面以下 1 m 位置。

2.5. 计算结果对比与分析

2.5.1. 基坑的整体变形分析

由于基坑内部土体开挖卸荷，车站基坑南北两侧沿着基坑延伸方向坑外地表土体发生明显沉降，基坑地连墙结构向基坑内侧变形移动，基坑整体变形呈现了较为明显的“空间效应”。基坑两侧土体变形呈现下凹的“弓字型”，其中较大沉降点区域并非发生于近基坑外侧地表，沉降点区域置于坑外 $5\text{ m}\sim 15\text{ m}$ 之间；另外由于坑外侧土体重力和挤推作用，使得外侧土体推向坑内，致使基坑底部中央范围产生较为明显的隆起。

2.5.2. 连续墙位移变形对比分析

模拟开挖的五种工况下地下连续墙水平位移，连续墙不仅能直观反映围护结构整体变形趋势，同时能间接反映基坑外侧土体的压力分布，是评定基坑稳定性的一个重要指标，通过数值模拟得出连续墙在各个工况下的水平位移云图，为了进一步分析基坑开挖过程中为地连墙的一般变形规律，我们将选取一些具有代表性的点，首先选取监测点 C30 和 C31，其中 C31 在基坑开挖过程中超过基坑可控值范围；再选取另一组两侧相对应的正常监测点 C28 和 C29 作为参照对比，将模拟数据与工程监测数据进行对比分析。

监测点的实测值和模拟值呈现的变形趋势基本一致，可以说明本次模拟是基本正确有效的，但受到土层划分、土体参数选择、边界条件设立与实际工况概况存在一定差异，以及基坑暴露时间、地下水或雨水渗流等影响，墙体水平位移的实测值普遍比模拟值偏大，C28 监测点地连墙水平位移模拟分析值和实际监测值存在一定的误差，最大误差发生在连续墙最大水平变形位置，大致在墙体 14.0 m 处附近，实测最大水平位移为 30.92 mm ，两者最大的差值为 3.04 mm ，实测值都超过了预警值 30 mm ，而模拟结果的最大值未超过预警值；之后选取 C28 对应同侧附近的监测点 C30，对比分析基坑同侧围护结构的变形差异，可以知晓 C30 监测点的实测值和模拟值呈现的变形趋势也基本一致，不难发现同侧点 C28 变形规律与 C30 大致相同，水平位移出现的位置在 14.0 m 附近，实测最大水平位移为 38.89 mm ，两者最大的差值为 4.1 mm ，同时模拟值和监测值都超过了预警值 30 mm ，但也都未超过可控值；之后对比分析基坑另一侧与 C30 相对应基坑另一侧的监测点 C31 的实测值和模拟值呈现的变形趋势仍旧类似，C31 的模拟最大值在基坑允许的可控范围 40 mm 以内，而监测的实际值却是超出了可控值，实测水平最大位移为 52.06 mm ，比模拟值高出了 19.97 mm ；基坑同侧的变形规律也十分接近，最大位移值发生的位置也较为一致，整体表现都为上凸“鼓包形”，模拟值相差量约为 6.6 mm ，监测值的相差量约为 8.2 mm ；对于基坑南北两侧的变形量，无论模拟值或是实测值基坑北侧墙体的位移量大于南侧土体位移量约 2.9 mm 左右；同为基坑南北两侧监测点，模拟值计算的最大水平位移偏差约为 3.2 mm 左右，而监测值最大水平位移相差约为 13.2 mm ；模拟值计算的最大水平位移偏差约为 5.7 mm 左右，而监测值最大水平位移相差约为 17.6 mm ；

造成以上数据差异的原因：首先，同侧地连墙监测点间距较大，监测点并不在同一个连续墙幅上，并且通过模拟分析最大位移偏差都属于可控值范围；其次，造成南北两侧地连墙变形存在差异的原因是场地内存在深厚的淤泥层，地连墙和内支撑硬度远高于坑外淤泥硬度，而且模拟值的差值与真实值的差

值较为接近,也验证了出此次模拟可以较为准确反映出工程现场的真实情况;最后造成 C30 和 C31 处连续墙水平位移过大的原因是基坑在该地段开挖时,由于施工速度过快,基坑开挖完毕之后并未及时设立钢支撑以及土体开挖卸荷过快,基坑存在超挖情况现象。

综上所述:数值模拟和监测结果得出:在基坑开挖初期墙体的水平变形都随挖深的增加而逐渐增大,位移最大出现在墙体中部以下位置,该段地连墙累积变形均超报警值,部分未及时竖立内支撑的部分出现局部变形超可控值,在及时竖立内支撑的同时墙体表面用泥浆进行护壁,连续墙变形速率得到了有效降低,累积变形也逐渐趋于稳定。

2.5.3. 基坑外地表沉降分析

基坑外地表沉降对比分析基坑开挖各工况下,基坑外侧土体竖向位移为各工况下数值模拟和工程监测沉降曲线对比可知:坑外地表沉降数值与监测沉降数值较为吻合,随着基坑持续开挖地表沉降逐渐增大,沉降的影响范围也不断向外扩展,根据前面分析,随着基坑不断开挖,坑外土体较大的沉降点出现在 5 m~15 m 之间,最大沉降点出现在坑外 10 m 左右,沉降都呈现凹槽型,在最大沉降点以内,远离基坑边缘沉降速率先增后减;而在最大沉降点以外,远离基坑边缘沉降值减小,变化幅度也随之减小。

当基坑开挖至 2.13 m,坑外地表沉降模拟和监测的最大值分别为 1.1 mm 和 1.2 mm,偏差值为 0.1 mm,偏差率为 8.3%;当开挖至 5.93,坑外地表沉降模拟和监测的最大值分别为 8.4 mm 和 7.6 mm,偏差值为 0.8 mm,偏差率为 9.5%;当开挖至 9.13,坑外地表沉降模拟和监测的最大值分别为 12.2 mm 和 11.0 mm,偏差值为 1.2 mm,偏差率为 9.8%;当开挖至 14.13,坑外地表沉降模拟和监测的最大值分别为 16.9 mm 和 15.3 mm,偏差值为 1.6 mm,偏差率为 9.47%;当开挖至基底,坑外地表沉降模拟和监测的最大值分别为 17.7 mm 和 16.0 mm,偏差值为 1.6 mm,偏差率为 9.60%。

分析以上基坑地表沉降可发现,沉降主要影响区域为基坑边缘 0 m~25 m 范围内,其中 5 m~15 m 内地表沉降较大;而距基坑边缘 0~5 m 为次要影响区域,该区域地表沉降仍较为明显;而距离基坑边缘 15 m 之外,沉降幅度也随之变小,且随距离不断趋于稳定。深厚淤泥质软土具有高压缩性,承载力低等特点,导致该基坑工程坑外影响范围较广,其影响宽度与基坑开挖宽度相当,同时也接近于开挖深度的 2 倍。

2.5.4. 基底隆起分析

基坑土体开挖至基坑底部时,原土体应力场失去平衡,加上机械、人工开挖震动作用,基坑底部土体回弹之后将会大大降低之前的密实程度,出现隆起现象;从工况一到开挖至基底,随着基坑开挖深度的增加,坑底的隆起量也随之增大,这是因为基坑开挖导致坑内外土压力差值越来越大,使得墙外侧土体向内侧土体发生挤推作用,从而使基底产生隆起,基坑坑底隆起主要集中在基坑底部中心区域,由于连续墙墙角边缘几乎不存在隆起量,模拟值仅为 0.65 mm 和 0.59 mm,而基坑底部中央隆起量达到 16.9 mm,此时基坑的整体隆起表现为中间大两边小“山丘”形式,完全符合狭窄或地铁车站长条形基坑隆起规律,由此可见此次模拟能够较为准确的反映施工现场真实情况。

2.6. 事故产生的机理

土体滑坡的形成是土体某一滑移面上抗剪强度不足以和剪应力平衡所致。滑坡形成的条件分为人为因素和自然因素,不合理人类工程生活将使土体的某些基本条件发生改变,大型车站基坑开挖类似于土体的边坡工程,如前所提,基坑土体开挖快速地致一方土体应力快速减小,为了平衡这种变化,留在坑内的土体应力状态将相应发生变化,导致发生形变,当形变超出了自身所能承受的极限时,就会造成边坡失去稳定,导致滑塌工程事故;目前所知,滑坡形成主要有以下几个方面[4] [5]:

1) 不合理的开挖卸荷引发的滑坡:

人类在工程建设过程中土体开挖卸荷破坏了自然土体的应力平衡, 滑坡事故也越发频繁。目前许多工程滑坡事件大都是由于不合理的开挖导致, 为了追赶工期, 看似安全的基坑内部随时都可能出现事故, 由开挖卸载引起的滑坡研究主要分为以下三种: 理论分析、监测变形、室内各类试验等。

2) 无规划的堆载或机械超载

随着科技水平不断创新, 越来越多的大型机械应用于工程, 加快了工程进度, 但是大型机械也存在不利于工程施工的负作用, 如开动过程中的扰动, 机械自重都会影响着开挖边坡的稳定性: 此外开挖土体以及废弃物的无序堆放都可能影响基坑的整体稳定。

3) 降雨及地下水作用引发的滑坡:

基坑开挖不可避免的造成大量土体松散和不规则开裂, 大规模的开挖很大程度破坏了土体整体性, 淤泥质软土的天然含水率大于液限, 孔隙比通常情况下在 1.0~1.5 之间, 存在一定的阻水性; 当突发性强降雨来临, 淤泥表面的滞水作用将导致地下水上升从而出发滑坡的发生。

2.6.1. 事故成因分析

1) 人为因素

① 边坡比例过陡

基坑采用台阶式施工开挖, 开挖层边坡比例未按照边基坑土体专项开挖方案要求进行放坡, 边坡角度较陡, 施工团队和管理人员素质不高。

② 过度开挖

为了加快工程进度, 现场土方开挖时, 对于淤泥软土层中的第二级和第三级台阶收坡较快, 基坑长时间形成局部超挖, 支撑建立严重滞后; 现场作业未按深基坑专项施工方案要求施工。

③ 局部超载

多个施工段同时开工, 大量开挖土体随意堆载, 大量挖掘机和泥头车等机械来回工作, 土体大规模严重扰动都影响着的影响了滑坡体的稳定性。

2) 自然因素

① 降雨

② 断裂

2.6.2. 理正岩土软件功用

北京理正软件股份有限公司编制的理正分析软件, 可以直观、准确、快速, 的计算边坡滑动安全系数。理正边坡稳定分析软件提供传统的: 瑞典条分法、简化 Bishop 法及简化 Janbu 法; 可根据工程要求采用不同的方法进行计算。针对于传统分析方法, 本文采用理正岩土边坡分析软件中的简化 Bishop 法计算开挖基坑边坡的安全系数以及滑裂半径。依据《建筑边坡工程技术规范 GB50330-2013》计算公式分别计算未加载坡顶荷载时, 超挖 0 m、3.8 m、3.2 m、5.0 m、3.0 m 基坑滑裂面以及基坑滑动安全系数。

通过分析得出: 基坑的超挖使得土体边坡的稳定性降低, 坡顶存在外荷载也会使得土体边坡的稳定性降低。

3. 边坡敏感性因素耦合分析

由于边坡系统的稳定性受各种不确定性复杂因素的影响[6], 诸如粘聚力、内摩擦角、土体容重、开挖深度、坡顶超载等; 本章着重分析众多敏感性因素对土体稳定性的影响程度。对于传统参数分析法消除了各种因素之间的相关影响, 有学者通过列出全面试验组合方案, 根据“正交性”通过研究其中具有

代表性的组合进行试验,发现其得出结果与全面试验结果一致,正交设计实验[7]应运而生,它不仅具有高效、简便的分析特点,而且也考虑了多因素存在时的交互作用;试验的工作量是减少了,但数据量却不高,我们还需要找寻另一种方法,它能适应正交试验数据不高、计算快捷,并且还能统一不同因素之间的“维”度,是因素之间具备可比性;而灰色关联分析法[8]就具备以上所需。为了避免传统分析方法结果差异问题,本章我们选取正交设计实验和灰色关联分析法进行耦合分析[9] [10] [11] [12] [13],前叙分析可知:影响基坑事故发生的潜在原因是事故基坑站存在深厚淤泥质土层,因此本文选取开挖淤泥土层进行边坡敏感性因素分析,结合以上两种分析法各有特点,分析出影响淤泥质土层边坡稳定性各项因素的敏感性大小,为同地区类似工程施工提供一定参考。

3.1. 正交试验设计法

3.1.1. 正交试验介绍

正交试验被广泛应用于诸多领域,传统的统计方法是用数据进行总结归纳并得出相应的结论;它巧妙的利用数理统计学原理,在传统完全统计法上进行了提取和精炼代表性数据理论,如何精准提取这些代表性组合数据是成功进行正交试验的前提条件,首先,必须根据所研究试验实际情况找到合适的正交试验表,通过所选正交表将必要数据进行相应的组合排列,然后通过列出的试验方式得出对应的试验结果,

正交试验具体的实验步骤:

- 1) 确定所需试验的目的和基本要求;
- 2) 选取试验对应的指标、因子和水平;
- 3) 选用合适且正确的正交表,做出正交表设计;
- 4) 列出试验方案,按方案进行试验;
- 5) 选择恰当分析方法进行结果分析。

3.1.2. 正交试验以及基本特性

正交试验设计的优点:

- ① 简化了全面试验的方案组合,从中选出具有代表意义的组合方案,大大减少了试验量。
- ② 因为随机事件的等可能性,通过分析选出的试验结果以达到了解全面试验的情况,并从中找出最优的水平组合。
- ③ 将试验结果通过不同数学或者统计手段,最为常见的就是探讨研究因素对于研究结果的敏感度问题,又或者试验因素不同变化下的影响趋势。

正因如此,正交试验具备通常完全试验所具备的一切特性,同时又减轻了完全试验所带来的庞大数据试验和分析时间,现如今,正交试验设计已经在各大领域科研中得到大量的推广和应用。

3.2. 灰色关联分析法

灰色关联分析的本质是通过影响因素在不同的水平状况下定量分析一个系统发展势态,其实际上就是通过给定已试验对象和其影响因素绘制的曲线与待试验对象和其影响因素的曲线形状的相似度来判断其联系是否紧密,由于影响因素都存在于不同系统中,我们就需要一种方法将其量化成数据,这样才能对比的各影响因素之间的关联性大小,这样就能准确的判断待识别对象对研究对象的影响程度。

3.2.1. 灰色关联的具体步骤

灰色关联分析法的具体步骤就是由待研究对象影响因子按一定顺序排列成子序列,之后通过选取能

反应研究系统特征的母序列经过无量纲化和求取灰色关联系数等步骤，最后在通过求取关联度进行大小排序来判定各因素的敏感程度。

相关的分析步骤如下：

1. 根据研究目的确定分析指标体系，收集分析数据。

a. 确定子序列矩阵 X

b. 确定母序列矩阵 Y

c. X 、 Y 矩阵数据无量纲化

不同影响因素对应的单位和量级各不相同，为了保证结果的可靠性，将对数据进行无量纲化以此消除单位和量级的影响。无量纲化公式如下：

e. 得到关联度和关联系数矩阵

f. 计算关联度及排序

MIDAS/GTS 作为岩土工程的重要工具，它不仅能分析基坑的变形特征，还可以进行边坡稳定性分析，张政杰^[14]通过有限元强度折减原理，通过不断折减土体粘聚力、摩擦角等对边坡进行了稳定性分析，最后证实了有限元强度折减法的有效性。本章采用有限元软件 MIDAS/GTS 建立边坡二维模型，假设土体为理想弹塑性材料，服从摩尔库伦准则。网格划分采用混合节点平面应变单元，边坡的二维模型 X 方向施加水平方向的位移约束，底部施加 X 、 Y 两个方向位移约束，距离坡顶 2 m 至 12 m 之间施加竖直方向不同的均布荷载，本试验考虑 6 个影响因素，它们分别是土体的粘聚力、内摩擦角、容重、开挖深度、边坡坡角、坡顶加载，通过正交试验设计计算不同组合方案下边坡稳定的滑动安全系数，最后通过灰色关联分析法处理所得到的滑动安全系数，得出关联度的大小来判断因素的敏感性。

3.2.2. 灰色关联分析

将多种组合方案通过 MIDAS/GTS 分别计算出其对应的边坡安全系数，并且通过计算各个因素在同一个水平下的平均值作为数据样本库导入灰色关联分析法中。

通过分析安全系数的大小，不难发现，即便在其他数个因素影响下，随着粘聚力的增大，边坡安全系数也不断增大；同理摩擦角的增大，边坡安全系数也不断增大，而对于容重、开挖深度、边坡坡角、坡顶荷载并未出现有规律的变化。边坡的开挖和加固应充分考虑敏感性较高的因素。

首先，淤泥质土粘聚力和摩擦角数值都比较小，对于确定的工程场所已经难以改变，所以在该土质开挖时增加必要的台阶长度，让放坡幅度变得更加的长缓，同时将一个长深边坡分层成若干个小边坡以增加边坡的稳定性，加强安全防护措施。

粘聚力继而内摩擦角是抗剪强度指标的重要参数，所以说抗剪强度指标也是边坡稳定性的主要敏感因素，说明抗剪强度指标的参数都可能影响边坡的稳定性，比如强降水和地下水都对抗剪强度有着弱化作用，同时也间接说明该基坑土体滑坡事故与降雨也有一定关系，强降雨时间段应随时避免大规模动土开挖，以防止大量降水和地下水对土体强度进行进一步的弱化，本章的研究为该地质土体边坡开挖提供了一定的参考和借鉴。

4. 结论

本文依托某地铁 3 号线延长线车站基坑为工程背景，通过监测数据结合数值模拟，采用 Midas GTS NX 有限元软件对临海淤泥型超长基坑深入探讨，分析了基坑连续墙体水平位移过大的原因，研究成果对该类似基坑工程具有一定的借鉴作用。本研究得出以下结论：

1) 基坑南北两侧的墙体变形都呈现上凸“鼓包型”形式，随着基坑开挖加深，地连墙的最小的水平位移点向下移动；基坑开挖结束时，水平位移最大位置出现在连续墙中部以下 14.0 m 左右；通过对比分

析基坑同侧墙体水平位移点, 基坑围护结构变形累计值都超过 30 mm 报警值; 由于所处场地存在深厚淤泥层, 模拟出基坑整体土体变形呈现下凸“盆地型”, 主要影响区域为基坑边缘 0 m~25 m, 沉降影响宽度与基坑开挖宽度相当, 也接近开挖深度的 2 倍; 其中较大沉降点区域置于坑外 5 m~15 m 之间; 模拟的数值略小于现场监测结果, 误差百分比约为 10%。

2) 产生南北两侧连续墙变形差异的原因是该场地存在深厚的淤泥质黏土层, 地连墙和内支撑刚度远超坑外的软土; 产生 C31 监测值超出控制值的原因是基坑在该地段开挖时, 由于超挖、施工速度过快而且开挖后未及时设立钢支撑, 导致内部卸载荷载的速度过快。

3) 外荷载加大了边坡 X 方向的位移和土体滑移, 同时使得滑移土体剪切应变增大; 超载和超挖两者都会使得土体边坡稳定性降低。事故基坑土体滑塌与坡角过大、局部超载、土体超挖占主导作用; 降雨以及地下水渗流对弱化了土体的强度也有关联。

4) 淤泥土质的边坡影响敏感性大小分别是粘聚力、内摩擦角、坡顶超载、容重、开挖深度、边坡坡角。其中边坡稳定性影响最大是粘聚力, 其次是内摩擦角的敏感程度最高, 明显大于其他四个因素, 对于确定的深基坑工程, 其粘聚力和内摩擦角无法改变, 验证了事故基坑土体滑塌主要原因是坡角过大、局部超载、土体超挖。

5) 粘聚力和内摩擦角是抗剪强度指标的重要参数, 也是边坡稳定性的主要影响因素, 说明抗剪强度指标的参数都可能影响边坡的稳定性, 另外强降水和地下水都对抗剪强度有着弱化作用, 间接说明该基坑土体滑坡事故与降雨也有一定关系。

参考文献

- [1] 程玉果. 基于 HSS 模型的群体基坑开挖的性状及相互影响分析[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 华侨大学, 2013.
- [2] 王大军. 某地铁车站深基坑有限元模拟及现场监测分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [3] 张瑞金, 胡奇凡. 摩尔库伦和修正摩尔库伦本构有限元模拟结果对比分析[J]. 中国房地产业, 2015(8): 256-258.
- [4] 范仲杰. 开挖卸荷型黄土滑坡形成机理研究——以延安刘万家沟滑坡为例[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [5] 朱文彬, 刘宝琛. 降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(4): 509-512.
- [6] 马显春. 基于可靠性理论的边坡稳定性评价研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006.
- [7] 周康民, 王璇. 正交试验在实验设计中的应用[J]. 地质学刊, 1998(4): 23-25.
- [8] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 曹颖. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [9] 邱均平, 刘国徽. 国内耦合分析方法研究现状与展望[J]. 图书情报工作, 2014, 58(7): 131-136.
- [10] 井培登, 范付松, 宋义亮, 罗延婷. 基于均匀设计的边坡敏感性灰色关联分析[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(2): 116-118.
- [11] 刘世豪, 叶文华, 陈蔚芳, 唐敦兵, 肖利利. 基于正交试验法和灰色关联的机床主轴箱优化设计[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 127-132.
- [12] 张家铭, 付金丹, 刘浩. 基于改进正交设计的山区弃土场边坡稳定性敏感分析[J]. 科技导报, 2012, 30(17): 38-42.
- [13] 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.
- [14] 张政杰, 王宏权, 李幼辉. 基于强度折减有限元法分析边坡稳定性[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(1): 135-137.