

深基坑支护结构设计中的地质参数敏感性分析

傅显显

安徽建筑大学设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230009

[摘要]地质参数的不确定性直接影响深基坑支护结构的稳定性,开展地质参数敏感性分析对优化设计方案很重要,构建典型深基坑有限元模型并结合多种地质参数变异情形来系统评估不同参数对支护结构位移、内力和安全系数的影响程度,结果显示土体的内摩擦角、黏聚力和弹性模量影响最显著且内摩擦角对基坑侧向位移最敏感,研究成果能给深基坑支护设计中的参数选取与风险控制提供理论依据。

[关键词]深基坑; 支护结构; 地质参数; 敏感性分析; 有限元法

DOI: 10.33142/sca.v8i7.17126

中图分类号: U452.2

文献标识码: A

Sensitivity Analysis of Geological Parameters in the Design of Deep Foundation Pit Support Structures

FU Xianxian

Anhui Jianzhu University Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230009, China

Abstract: The uncertainty of geological parameters directly affects the stability of deep foundation pit support structures. Conducting sensitivity analysis of geological parameters is important for optimizing design schemes. A typical deep foundation pit finite element model is constructed and combined with various geological parameter variations to systematically evaluate the degree of influence of different parameters on the displacement, internal force, and safety factor of the support structure. The results show that the internal friction angle, cohesion, and elastic modulus of the soil have the most significant impact, and the internal friction angle is most sensitive to the lateral displacement of the foundation pit. The research results can provide theoretical basis for parameter selection and risk control in deep foundation pit support design.

Keywords: deep foundation pit; supporting structure; geological parameters; sensitivity analysis; finite element method

引言

城市化进程加快且地下空间开发增多,深基坑工程在城市建设中被广泛应用,在复杂地质条件下支护结构安全面临很多挑战且地质参数不确定常是影响设计精度和工程稳定性的关键,合理识别、分析关键地质参数敏感性能优化设计路径并有效提升基坑施工安全保障水平以及给工程决策科学支持。

1 深基坑支护结构设计概述与地质参数作用机理

城市地下空间开发中深基坑工程很重要,其工程安全直接取决于支护结构设计是否合理,而地质参数是设计输入的核心内容,得深入探讨它的作用机理和影响才能让设计更科学可靠。

1.1 深基坑支护结构的基本类型与设计要点

深基坑支护结构主要用于控制土体位移、防止基坑坍塌以及保障周边环境安全,在不同地质条件与使用需求下,放坡支护、重力式支护、排桩支护、地下连续墙、锚杆加支护等是常见支护形式,软土地区的排桩和地下连续墙因高刚度且止水性良好而应用广泛,设计时要综合基坑深度、土层结构、水文地质条件、周边环境等因素选型,支护结构的结构设计需满足强度、稳定性和变形控制要求,内力计算和变形预测一般采用极限平衡法、有限元分析等方法,确定安全系数时要充分考虑施工阶段的不确定性以保障结构在全过程稳定。

1.2 地质参数对支护结构行为的影响机制

土体的内摩擦角、黏聚力、弹性模量、泊松比、单位重度及孔隙水压力系数等都被包含在地质参数里,且土体的抗剪强度、刚度和变形特性直接受这些参数影响。深基坑开挖时,土体应力状态会改变并产生侧向压力和位移,这得由支护结构来承受。土体的抗滑稳定性由内摩擦角和黏聚力决定,边坡破坏和围护结构受力受这两因素的关键影响,基坑变形特性受弹性模量影响,这对支护结构刚度要求有导向意义。参数取值偏差大的话,结构过度设计或者出现安全隐患都有可能,明白各参数在结构响应中的作用机制,这对提高设计精度、减少不必要的工程开销很重要。

1.3 地质参数不确定性对设计精度的影响

地质条件复杂且现场勘察手段有局限性,实际得到的地质参数常存在一定程度的不确定性,这种不确定性在基坑设计时若未被充分考虑,结构响应预测就可能出现偏差进而影响支护体系的安全性和经济性,弹性模量小或者内摩擦角被低估时,支护结构的位移和内力可能被高估从而需加大构造尺寸造成资源浪费,反之风险可能被低估导致结构被破坏,设计时要用敏感性分析找出关键参数,再结合统计方法或者概率模型合理确定设计值以使结构设计更可靠。

2 地质参数选取与敏感性分析方法构建

深基坑支护结构设计合理性和可靠性的提高,关键在

于准确选取地质参数并构建科学的敏感性分析方法,系统化分析手段可有效识别影响结构响应的核心因素,给设计优化提供依据。

2.1 常用地质参数的选取原则

现场勘察数据和试验结果是选取地质参数的依据,综合判断时需将区域地质背景、土层分布特征以及工程经验考虑进去,内摩擦角、黏聚力、弹性模量、单位重度、泊松比、渗透系数等是常用参数且土体的强度特性、变形能力和稳定性指标由这些参数代表,原位测试数据优先采用像标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)、十字板剪切试验(VST)等的的数据能反映真实工况,要是多层土体或者复杂地层参数需分层定义而不能用平均值替代否则结果会失真,参数有离散性需统计分析各参数的变异范围再根据工程重要性确定代表值这样设计输入才合理可靠。

2.2 敏感性分析模型的建立流程

通常基于有限元或者有限差分数值模拟平台构建敏感性分析模型,利用控制变量法或者多参数扰动法系统地评估各参数对结构响应的的影响程度,先建立符合实际工况的深基坑模型以精准反映支护结构形式、土体分布、开挖顺序以及边界条件,接着在保持其他参数不变的情况下给目标参数施加一定范围(如±10%、±20%之类)的扰动并分析结构变形、内力以及安全系数等响应的变化幅度,可用灵敏度系数或者贡献率指标将结果量化以明确参数影响的相对程度,若涉及多个参数还能引入多元回归、响应面法、拉丁超立方采样等统计方法高效全面地进行敏感性评估,这一流程能为设计人员提供清晰的参数一响应关系图谱助力设计优化和风险控制。

2.3 地质参数敏感性分级方法

各地质参数敏感性结果得分分类分级才便于工程实践应用从而形成有指导意义的评价体系,敏感性一般能分成高敏、中敏、低敏三个等级,内摩擦角、弹性模量等高敏参数会使结构位移和内力因微小变动就发生显著变化,黏聚力、单位重度这类中敏参数对稳定性影响大且对变形影响处于中等水平,泊松比、渗透系数这些低敏参数在多数工况下对结构响应的的影响比较有限,可结合灵敏度系数阈值或聚类分析等算法定量判断这个分级,敏感性等级明确后在设计和施工阶段就能有针对性地强化关键参数控制从而提高地质勘察精度、更合理地分配资源,参数调整和模型简化时按照分级结果科学取舍就能提升工程分析效率和经济性。

3 不同地质参数对支护结构响应的的影响对比

深基坑支护结构响应受不同地质参数影响程度各异,识别这种差异对工程设计很关键,而对比分析各参数影响效应能明确设计重点和控制要素,提高结构安全性与经济性。

3.1 内摩擦角对结构变形的控制作用

土体颗粒间的抗剪能力由内摩擦角反映出来,而基坑边坡稳定性和支护结构侧向位移受其影响,它是核心参数,敏感性分析时,基坑变形受内摩擦角变化的影响非常显著,

内摩擦角增大时土体剪切强度就提升,从而基坑侧壁土压力会明显减小,进而支护结构承受的水平荷载跟着降低,结构变形幅度大大减少,而内摩擦角小的时候,土体抗滑能力下降,边坡容易失稳,结构变形可能超限,严重的话支护系统会被破坏,该参数和土体类型、压实程度以及颗粒级配关系密切,因此设计时得先保证取值准确,像砂土、粉土这种摩擦型土体,要加强内摩擦角的现场测试和验证,防止因估值有偏差产生工程安全隐患。

3.2 黏聚力与基坑稳定性的关系

土体抵抗剪切破坏的另一关键参数是黏聚力,在黏性土中它对稳定性起着重要作用,和内摩擦角比起来,黏聚力对基坑变形的影响比较小但对整体抗滑稳定系数的贡献挺明显,敏感性分析结果表明,黏聚力升高时土体整体强度跟着提升、滑动面出现剪切破坏的风险会降低且支护结构的安全储备增加,降雨、地下水水位波动等工况下尤其要注意,黏聚力要是降低了土体可能就软化、结构支撑效果会被显著削弱且可能诱发局部失稳,软土地区或者有高填土的场地得充分考虑黏聚力对基坑安全的影响,勘察和实验的时候要把不固结不排水剪切试验(UU)、快速无侧限抗压试验这些方式结合起来以得到更有代表性的黏聚力参数值,它容易受含水率影响,施工期间要加强对土体含水状态的监测以预防时变效应带来的稳定性问题。

3.3 弹性模量对支护刚度的调控作用

土体在荷载作用下的变形能力由弹性模量反映出来,它是评估基坑变形控制效果的重要参数之一,对比分析显示,支护结构位移和弹性模量呈显著负相关关系即弹性模量越大结构位移就越小,数值模拟时,弹性模量增加能有效让围护墙体水平移动和基坑底部隆起程度降低从而减少对周边建(构)筑物的不利影响,弹性模量在土层间变化大且在软弱地基中波动更显著,若设计用统一经验值的话分析结果容易失真,要提高模型精度,各主要土层的弹性模量值得独立设定,实际参数建议通过室内三轴压缩试验或者板载荷试验获取并适当结合修正系数反映施工扰动影响,对这个参数进行敏感性分析能在设计阶段合理配置支护结构刚度以使结构响应和土体性能协调性提高从而减少刚性不匹配产生的应力集中和潜在变形。

4 关键敏感参数识别与工程设计优化建议

深基坑支护设计的关键在于识别关键敏感地质参数,这是提升设计精度与工程安全性的重要步骤,明确敏感性高的参数并制定有针对性的优化策略就能有效增强结构适应性、提升整体经济效益。

4.1 高敏感参数识别的判别方法

建立科学、量化的判别标准是识别地质参数敏感性的关键,灵敏度系数法、影响因子排序法、主成分分析、响应面分析等是常用方法,其中灵敏度系数法能对比参数扰动前后结构响应的相对变化率,明确各参数对位移、内力或安全系数的影响程度,操作简便且直观性强,主成分分

析在多参数条件下可揭示变量内在关系,有助于识别综合影响最大的关键因子,有限元分析结果中的灵敏度图谱也能被借助,直观呈现各参数变化对基坑稳定性的空间分布影响,实际工程中,多方法结合可增强识别结果准确性,为后续设计优化奠定坚实数据基础。

4.2 重点参数控制策略与措施

高敏感参数被识别出来后,勘察、设计与施工阶段需采取差异化控制措施才能降低其不确定性带来的风险。地质勘察阶段要加密高敏感区取样点且提高试验频次和参数覆盖范围,优先采用压力计、静力触探等原位测试手段以获取更可靠数据;设计阶段建议用保守估值或者概率范围设计高敏感参数并预留结构调节余量,防止因估计偏差造成结构超载或者变形失控,还可引入参数区间分析或者蒙特卡洛模拟等方法来评价结构在不同参数组合下的性能边界以提高设计的稳健性;施工阶段要实时监测和反演高敏感参数对应的结构响应如墙体位移、支撑轴力等,从而动态修正模型、优化施工方案以确保结构在实际条件下的适应性和安全性。

4.3 优化设计的工程实践价值

关键敏感参数被识别并针对性控制,深基坑支护设计的合理性与工程效益就能显著提升,实际项目里敏感性分析成果常用来指导支护结构的类型选择、刚度配置和施工工艺制定,从而避免“盲目加固”或者“结构冗余”之类的问题,就像某软土地区的基坑工程,内摩擦角和弹性模量被识别为高敏参数后,设计人员加大了相关参数的试验密度,用可调刚度支撑体系应对变形风险,让支护系统兼顾轻量化与安全性,敏感性分析结果还能用于制定分阶段施工和应急预案,增强对突发地质变化的响应能力。

5 地质参数敏感性分析在深基坑设计中的应用价值与展望

地质参数敏感性分析是连接地质不确定性与工程响应的关键桥梁,在深基坑支护设计里正显示出愈发重要的应用价值,科学分析参数影响能助力工程优化、风险控制与智能决策。

5.1 指导设计参数取值的科学依据

地质参数敏感性分析为识别关键参数提供了定量手段,使设计者能在众多土体参数中清楚哪些对结构安全性和稳定性起主导作用,从而防止“平均化”或者“经验化”处理造成的误判,并且在参数取值时有利于优化试验资源配置以及为保守估值提供数据支持,分析中若发现内摩擦角对支护结构位移特别敏感,则需优先保证该参数测试准确且有代表性,在设计中设置安全裕度,精细建模结构响应和地质参数的关系便从“经验导向”转变成“数据驱动”设计,参数选取的科学性和工程适应性也得到有效提高。

5.2 增强基坑工程风险管理能力

在基坑工程里,地质条件的不确定性是潜在风险的重

要来源,而敏感性分析是理解这种不确定性传播路径的关键工具。工程师构建参数扰动模型可模拟各种不利工况下的结构响应以识别薄弱环节并制定有针对性的应对策略,给高敏感参数搞实时监测、动态反演与预警机制,这样就能及时捕捉参数变化引发的结构响应偏差,提前采取加固或者调整施工顺序等措施从而大大降低工程风险。在工程投标、施工组织和应急预案制定阶段,敏感性分析结果可作为决策依据,这会增强项目各方识别和应对地质风险的能力从而推动基坑工程全过程风险可控化管理。

5.3 推动智能化与数字化设计转型

BIM 技术、数值模拟平台和大数据算法不断发展,深基坑设计的智能化流程正逐步融入地质参数敏感性分析,且参数反演技术、机器学习模型与之相结合,敏感性分析不但能高效处理多源地质信息,还能预测结构响应应对参数波动的非线性影响以提升分析精度与决策前瞻性,可与建筑信息模型联动实现设计—施工—监测全周期的信息共享和响应调节,为数字孪生技术应用于地下工程提供基础支持,以后随着智能算法持续演进,敏感性分析在辅助设计优化、自动化风险评估和实时反馈控制方面将发挥更大潜能,成为深基坑工程智能建造的重要组成部分。

6 结语

深基坑支护结构设计中地质参数敏感性分析是贯穿参数选取、结构响应分析与设计优化过程的关键环节,科学识别高敏感参数既能让地质勘察更有针对性、提高设计精度,又能有效提升工程安全性和经济性,实践表明内摩擦角、黏聚力和弹性模量是基坑稳定性和结构变形的主要影响因素需重点控制并动态管理,随着工程技术和信息化手段不断发展敏感性分析会进一步融入数字建造和智能设计促使深基坑工程迈向高效、安全、智能新阶段。

[参考文献]

- [1]张耀强.深基坑支护结构设计方案优化及其工程应用[D].山东:中国石油大学(华东),2022.
- [2]魏奇科,傅翔,黄加羽,等.基于地质模型的支护结构设计施工一体化研究[J].重庆建筑,2022,21(1):183-186.
- [3]詹文文.复杂地质条件下基坑支护结构设计及数值模拟研究[J].江西建材,2024(3):173-174.
- [4]张朋,张全焯.基于矿山地质条件的深基坑支护结构与优化研究[J].世界有色金属,2025(7):118-120.
- [5]夏祺.建筑工程深基坑支护结构设计研究[J].价值工程,2025,44(16):55-58.

作者简介:傅显显(1987.2—),男,毕业院校:安徽建筑工业学院;所学专业:勘查技术与工程,当前就单位:安徽建筑大学设计研究总院有限公司,职务:专业副总工,职称级别:高级工程师(副高)。