

复杂地质条件下深基坑支护稳定性分析与优化

张鑫义, 刘峰, 王浩辰, 周鹏君, 刘洋

(陕西建工第九建设集团有限公司, 榆林 719000)

摘要: 复杂地质条件下基坑工程的支护稳定性直接影响施工安全和周边环境保护。以某深基坑工程为研究对象, 通过数值模拟, 分析了基坑的变形规律、地质参数对支护性能的敏感性 & 优化设计方案在极限工况和长期使用条件下的性能表现。结果表明: 在静态工况下, 基坑最大水平位移为 0.68 cm, 沉降量为 1.23 cm, 主要集中在基坑顶部和中部区域; 在暴雨和地震工况下, 优化支护方案的最大水平位移分别为 0.87、1.05 cm, 均未超出设计安全范围; 长期性能预测显示, 在 50 年使用寿命内, 最大水平位移和沉降量分别增长至 1.58、2.75 cm。研究可为复杂地质条件下深基坑支护体系的设计优化提供技术支持, 并对极端工况和长期使用条件下的基坑稳定性评估具有参考意义。

关键词: 深基坑支护; 复杂地质条件; 地质参数; 动态稳定性; 长期性能预测

中图分类号: TU752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0128-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.019

Stability Analysis and Optimization of Deep Excavation Support under Complex Geological Conditions

ZHANG Xinyi, LIU Feng, WANG Haochen, ZHOU Pengjun, LIU Yang

(Shaanxi Construction Ninth Construction Group Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: The stability of excavation support under complex geological conditions directly impacts construction safety and environmental protection. This study investigates a deep excavation project using numerical simulations to analyze the deformation patterns, the sensitivity of geological parameters on support performance, and the effectiveness of optimized designs under extreme and long-term conditions. Results indicate that, under static conditions, the maximum horizontal displacement of the excavation is 0.68 cm, and the settlement is 1.23 cm, primarily concentrated at the top and middle regions. Under extreme conditions such as heavy rainfall and seismic events, the optimized support scheme limits the maximum horizontal displacement to 0.87 cm and 1.05 cm, respectively, within safe design thresholds. Long-term performance predictions show that over a 50-year lifespan, the maximum horizontal displacement and settlement increase to 1.58 cm and 2.75 cm, respectively. This study provides theoretical guidance for optimizing deep excavation support systems under complex geological conditions and offers valuable insights for stability assessments under extreme and long-term operational conditions.

Key words: deep excavation support; complex geological conditions; geological parameters; dynamic stability; long-term performance prediction

0 引言

复杂地质条件下的深基坑工程广泛应用于城市轨道交通、地下综合体及高层建筑基础工程中，其支护体系的稳定性直接关系到施工安全与周边环境保护。由于地层非均质性、地下水变化及施工扰动等因素的影响^[1]，基坑开挖过程中极易产生显著变形与应力重分布问题，从而增加支护结构失稳及周边沉降风险^[2]。因此，开展复杂地质条件下基坑支护稳定性分析与优化研究，对于保障工程安全具有重要工程意义。

围绕深基坑支护稳定性问题，国内外学者已开展了较多研究。已有研究主要以基坑变形控制、支护结构受力分析和稳定性评价为目的，采用现场监测、理论分析、模型试验和数值模拟等方法，对不同地层条件下的基坑响应进行了分析^[3-4]。其中，数值模拟方法能够较好反映土体非线性变形和支护结构受力变化，已被广泛用于复杂地质条件下基坑稳定性研究^[5-6]。针对富水地层和复杂地质条件，有学者分析了地下水、岩溶及非均质地层对基坑稳定性的影响，指出渗流作用和地层差异是影响支护体系变形的重要因素^[7-8]。近年来，部分研究进一步考虑支护结构截面形式、预加轴力及组合支护方式对深基坑稳定性的影响，为支护参数优化提供了参考^[9-10]。同时，也有学者基于双排桩、斜撑及注浆加固等支护措施，分析了不同支护形式对基坑变形控制和稳定性的改善作用^[11-12]。在计算方法方面，强度折减法、井筒式基坑分析方法及考虑尺寸效应的稳定性评价方法被用于不同类型基坑的安全分析^[13-14]。此外，开挖顺序、内支撑刚度和施工阶段控制对软土基坑稳定性的影响也受到关注，相关研究表明施工过程控制是影响基坑变形发展的重要因素^[15-16]。

总体来看，已有研究为复杂地质条件下深基坑支护设计和稳定性评价提供了重要依据，但仍存在以下不足：一是对不同地质参数影响程度的对比分析仍不够充分；二是静态工况、暴雨工况、地震工况和长期使用条件之间的连续分析不足；三是支护方案优化多侧重单一工况，缺少对变形控制效果、动态稳定性和长期经济性的综合评价。以某复杂地

质条件下深基坑工程为研究对象，建立基坑支护体系数值模型，分析基坑水平位移和沉降量的时程变化规律，开展地质参数敏感性分析，比较不同支护方案的变形控制效果；进一步考虑暴雨、地震及长期使用条件，对优化支护方案的极限工况稳定性、动态响应和长期性能进行评价，以期为复杂地质条件下深基坑支护设计优化和施工风险控制提供参考。

1 工程概况

以某商业综合体项目为试验对象，该综合体地上 14 层，地下 2 层，总高度为 65.3 m，开挖基坑深度为 12.5 m，总开挖面积约为 6 000 m²。项目基坑毗邻重要市政设施，北侧距供水管线约 5 m，西侧距地铁隧道约 20 m，南侧邻近多层办公楼，周边环境对变形控制要求较高。基坑支护设计为双排灌注桩和单层预应力锚索组合支护体系，采用钢筋混凝土支护桩，桩径 1.0 m，桩间距 3.0 m，嵌固深度 15 m。锚索预应力初值为 100 kN，倾角为 15°，水平间距为 2.5 m。

场地土层主要包括三种典型土层：黏质粉土层、砂质粉土层和强风化泥岩层。地质勘查表明，基坑地下水位较高，位于基坑顶部以下约 2 m，需特别考虑地下水对支护体系稳定性的影响。地层的物理力学参数见表 1。

表 1 主要地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of main soil layers

地层类型	厚度 /m	黏聚力 /kPa	渗透系数 /(cm/s)	抗剪强度 /kPa	压缩模量 /MPa
黏质粉土	3.2	18.5	4.2×10^{-5}	18.5	8.0
砂质粉土	6.5	6.2	7.5×10^{-4}	6.2	12.5
强风化泥岩	10.0	25.0	3.1×10^{-3}	25.0	30.0

根据工程的地质条件及环境要求，支护桩施工采用钢筋混凝土浇筑，设计强度等级为 C40，截面尺寸为 1 m×1 m。

2 模型构建与工况设置

基于工程实际尺寸及支护体系布置，建立深基坑支护体系数值分析模型。模型计算域尺寸为 2.5 m×1.5 m×1.0 m。为保证模型能够反映原型工程的主要受力与变形特征，模型设计遵循几何相似原则，并在重力场条件下考虑应力传递与渗流作用的

岩土力学

相似要求。模型中设置加载系统、地下水位调节条件及位移监测点,用于模拟上部荷载、地下水变化及基坑开挖过程中的变形响应。基坑支护布置间距为 0.06 m,锚索倾角为 15°。加载系统采用分布荷载模拟上部建筑荷载,加载值为 50 kPa。

计算工况设置为:①地下水位高度分别为-2、-5和-8 m;②设置 50 kPa 的均布荷载,并逐步加载至 70 kPa,以分析荷载增加条件下支护体系的变形响应;③监测支护桩弯矩、剪力、基坑水平位移和沉降量;④通过水位快速上升模拟暴雨环境,同时叠加频率为 1 Hz 的动态荷载,以分析极端工况下基坑支护体系的稳定性。

采用有限元软件 PLAXIS 3D 建立基坑三维数值模型。边界条件设置为基坑底部固定,周边为自由排水边界。静态工况设置为均布建筑荷载 50 kPa,动态工况设置为地震加速度 0.15g。计算过程中采用渗流-应力耦合模型分析地下水变化对土体应力状态及支护结构变形的影响,并采用达西定律模拟地下水渗流,计算公式如下:

$$Q = -K \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

式中: Q 为渗流速率; K 为土体的渗透系数; H 为水头高度; x 为水平距离。

为检验模型计算结果的合理性,结合工程地质参数、支护结构设计参数及变形控制要求,对模型边界条件、荷载设置和计算结果进行校核。模拟结果显示,基坑水平位移和沉降量随施工过程逐步发展并趋于稳定,变形集中区域与深基坑开挖过程中土体应力释放及支护约束规律一致,表明所建模型能够较合理反映复杂地质条件下基坑支护体系的变形特征,可用于后续参数敏感性分析、极限工况模拟及支护方案优化研究。

3 结果与讨论

3.1 基坑变形规律

基坑变形的时空演变规律直接反映了施工过程中的支护效果与土体响应。模拟不同时间段内的基坑水平位移和沉降变化,以揭示其受支护设计与地质条件影响的特性,如图 1 所示。

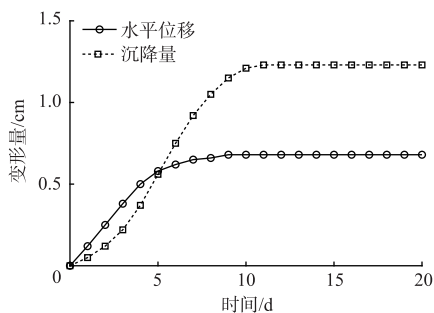


图 1 基坑变形随时间变化情况

Fig. 1 Time-dependent deformation of the foundation pit

基坑水平位移和沉降量均在施工前 10 天内快速增长,随后逐步趋于稳定。水平位移在施工前期增长较快,从 0 增加至 0.68 cm,而后保持稳定;沉降量则从初始值 0 快速增长,在第 15 d 达到 1.23 cm 后趋于稳定,表明支护体系的效果随着施工进度逐步显现,尤其在锚索预应力施加完成后,位移控制效果显著。进一步分析可知,水平位移的分布主要集中在基坑边坡顶部,其变形幅度大于中部和底部,说明顶部侧向约束力较弱。沉降量的分布特征显示基坑中部区域的沉降较大,可能与砂质粉土层的渗透性较高及地下水位下降导致的土体压力集中有关。基坑变形规律表明支护体系的设计需进一步优化,特别是锚索布置间距和桩间刚度的调整。在施工前期,增加顶部侧向约束力是控制位移的关键;而后期沉降量的均匀性改善可通过优化地基承载力设计来实现。

3.2 敏感性分析

地质参数直接影响支护性能的优劣,研究通过改变土层的抗剪强度、渗透系数和压缩模量,探讨其对基坑水平位移和沉降量的影响。在保持其他参数不变的情况下,逐一改变某一地质参数,结果如图 2 所示。

基坑水平位移和沉降量对抗剪强度的变化表现出较高的敏感性。当抗剪强度从 0.8 倍基准值增加到 1.2 倍基准值时,水平位移从 0.70 cm 降低至 0.60 cm,降幅约 14.3%;沉降量从 1.30 cm 减少至 1.20 cm,降幅为 7.7%,表明抗剪强度的提高增强了支护体系的侧向约束能力,同时减少了土体的压缩变形。此外,不同参数对基坑稳定性也有影响,渗透系数的变化对水平位移的影响较小,但对沉降量的影响较大。

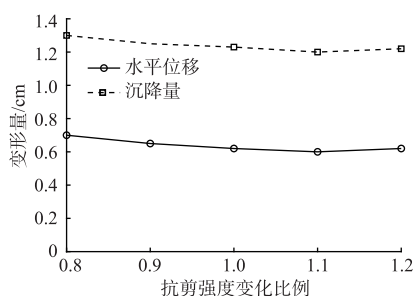


图2 地质参数变化对基坑变形的影响

Fig. 2 Influence of geological parameters on foundation pit deformation

压缩模量的变化则对两者也有影响, 压缩模量从 0.8 倍基准值增加到 1.2 倍基准值, 沉降量的减少幅度达到 11.1%, 表明提高土体的承载力是优化基坑稳定性的重要方向。

因此, 地质参数的优化应结合工程条件重点考虑抗剪强度和压缩模量的提升。提高抗剪强度可以显著降低侧向位移, 而增大压缩模量则有助于减少沉降量。此外, 在高渗透性土层中, 控制地下水位和改善排水条件也是降低沉降的重要手段之一。

3.3 支护体系力学性能

对三种典型支护方案进行了对比分析, 包括基础方案 (双排灌注桩+单层锚索)、优化方案 1 (双排灌注桩+双层锚索) 和优化方案 2 (双排灌注桩+三层锚索)。分析了三种方案下基坑的最大水平位移和沉降量, 结果如图 3 所示。

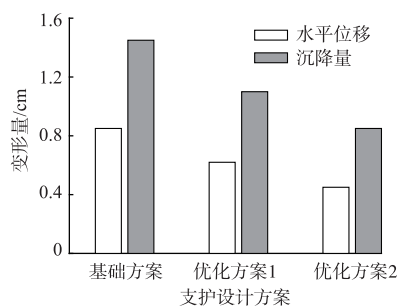


图3 不同支护方案的变形量

Fig. 3 Deformation under different support schemes

支护体系的力学性能随着锚索层数的增加逐步改善。基础方案下的最大水平位移和沉降量分别为 0.85、1.45 cm, 而优化方案 1 通过增加一层锚索使水平位移减少至 0.62 cm, 沉降量减少至 1.10 cm。进一步增加锚索层数至三层 (优化方案 2), 最大水

平位移降低至 0.45 cm, 沉降量降低至 0.85 cm。随着锚索层数的增加, 侧向约束力逐渐增强, 支护桩的内力分布更加均匀, 从而有效减小了水平位移。同时, 多层锚索的预应力通过限制土体的竖向变形, 降低了沉降量。特别是在优化方案 2 中, 三层锚索的布置使得支护桩顶部和底部的变形差异明显减小, 整体力学性能更佳。

增加锚索层数是提高基坑稳定性的重要手段, 尤其适用于深基坑和高地下水位的复杂场地。然而, 锚索数量的增加将显著提高施工成本和时间, 因此需要根据工程实际情况进行经济性评估。未来设计中, 可进一步优化锚索布置间距和预应力值, 以在性能和成本之间实现平衡。

3.4 极限工况下基坑稳定性

暴雨工况中, 快速升高地下水位至基坑顶部以下 1.0 m, 模拟持续降雨过程对基坑变形的影响; 地震工况中, 施加水平地震加速度为 0.15g 的动力荷载, 分析地震作用下基坑的侧向位移和沉降量变化。结果如图 4 所示。

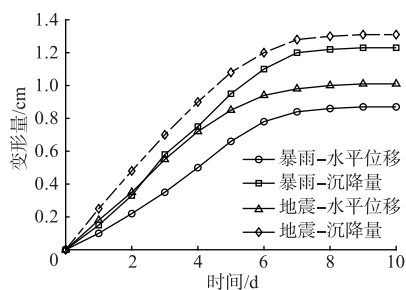


图4 极限工况变形量

Fig. 4 Deformation under extreme loading conditions

暴雨工况下, 基坑的最大水平位移为 0.87 cm, 最大沉降量为 1.23 cm, 变形主要集中在基坑顶部和底部交界处, 表明地下水位的快速升高导致土体剪切强度降低。地震工况下, 基坑的最大水平位移为 1.01 cm, 最大沉降量为 1.31 cm, 较暴雨工况有所增大, 表明地震加速度引发的动力荷载对基坑稳定性的影响更明显。进一步分析得, 暴雨工况中, 地下水位的快速升高导致砂质粉土层的渗透性增大, 支护桩和锚索的约束力显著减弱, 表现为水平位移和沉降量的快速增长。在地震工况中, 动力荷载引发土体的非线性响应, 导致基坑侧向位移的明显增

岩土力学

大, 支护体系顶部弯矩和底部剪力均达到极限值, 进一步提高了变形风险。极限工况下基坑稳定性评估结果表明, 现有支护设计在暴雨和地震工况中能够有效控制变形, 但需针对顶部和底部的极限响应进行优化。在暴雨条件下, 应加强基坑排水系统的设计, 以降低地下水位对土体强度的削弱作用; 在地震条件下, 可通过提高支护桩嵌固深度和优化锚索预应力分布来增强动态荷载下的稳定性。

3.5 动态稳定性

为验证优化方案(双排灌注桩+三层锚索)的动态稳定性, 在不同地震加速度条件(0.05g~0.30g)下模拟基坑的水平位移和沉降变化, 结果如图5所示。

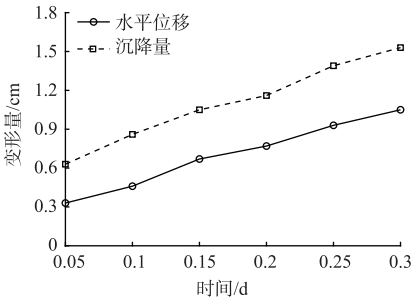


图5 优化方案动态稳定性
Fig.5 Dynamic stability of the optimized scheme

优化方案的水平位移和沉降量随地震加速度的增加呈非线性增长趋势, 当地震加速度为0.05g时, 水平位移为0.33 cm, 沉降量为0.63 cm; 在地震加速度增加至0.30g时, 水平位移为1.05 cm, 沉降量为1.53 cm。尽管在高加速度工况下变形幅度有所增加, 但优化方案的支护体系仍能保持较好的动态稳定性, 说明优化方案中的三层锚索布置和增加的嵌固深度增强了基坑的抗震性能。特别是在中低加速度条件(0.05g~0.15g)下, 支护体系的约束力充分发挥作用, 基坑变形幅度较小; 而在高加速度条件下(0.20g~0.30g), 尽管支护结构顶部的水平位移和底部的沉降量有所增大, 但整体仍未超出设计的安全范围。建议在高动态荷载条件下进一步优化锚索的布置密度和预应力值, 同时加强对基坑顶部和底部的局部加固措施, 以提高支护体系的整体动态稳定性。

3.6 支护性能与经济性分析

通过数值模拟结合长期荷载累积模型, 分析了

优化方案(双排桩+三层锚索)支护性能在50年使用寿命内的变形规律和支护效能, 结果如图6所示。

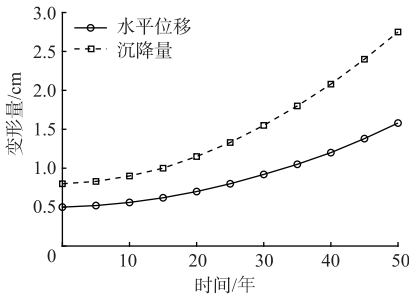


图6 长期使用条件下支护性能
Fig.6 Support performance under long-term service conditions

随使用年限的增加, 基坑水平位移和沉降量逐渐增大。在使用第10年内, 水平位移从0.50 cm增加到0.62 cm, 沉降量从0.80 cm增加到1.00 cm, 增幅相对较小; 但在使用第30年后, 材料劣化和土体蠕变效应加剧, 变形增长速率显著提高, 到使用第50年时, 水平位移和沉降量分别达到1.58、2.75 cm。长期变形的主要影响因素包括支护材料强度的下降和土体的长期压缩性。

为综合评价支护体系的长期性能和经济性, 分别对基础方案(双排桩+单层锚索)和优化方案(双排桩+三层锚索)进行了成本与效能分析。优化方案在长期稳定性表现上优于基础方案, 但成本增加较为明显。具体经济性对比见表2。

表2 支护体系长期使用条件下经济性对比
Table 2 Economic comparison of support systems under long-term service conditions

方案	维护成本 /(万元/年)	总成本 /万元	单位成本控制效益 /(cm·万元 ⁻¹)
基础方案	5	330	0.12
优化方案	8	520	0.21

基础方案的初始投资成本较低, 但长期维护成本较高, 总成本为330万元, 且单位变形量减少的效能较低, 仅为0.12 cm; 优化方案虽然初始投资较高(120万元), 但长期效能显著提升, 单位变形量减少的效能达到了0.21 cm, 总成本为520万元。结合长期使用条件的支护性能预测, 优化方案更适用于对变形控制要求较高的工程场景。长期使用条件下的支护设计应综合考虑材料劣化、荷载累积效应和维护成本, 通过提高支护材料耐久性、优化支护桩和锚索布置及定期维护策略, 减少长期变形对基坑稳

定性的影响。未来研究可进一步结合智能监测系统,实现对基坑长期稳定性的动态评估和维护策略优化。

4 结论

基于复杂地质条件下深基坑支护体系,研究分析了基坑的变形规律、支护体系性能及优化设计方案的动态与长期稳定性,得出以下结论:

(1) 基坑水平位移和沉降量随施工时间逐步增加并趋于稳定。静态工况下,最大水平位移0.68 cm,沉降量1.23 cm,变形主要集中在基坑顶部和中部区域。

(2) 不同地质参数对支护性能的影响具有较大差异。抗剪强度从0.8倍基准值增加至1.2倍时,水平位移减少14.3%,沉降量减少7.7%。压缩模量的提高对减少沉降量效果明显,沉降量降幅为11.1%。

(3) 相比基础方案(双排桩+单层锚索),优化方案(双排桩+三层锚索)在静态工况下最大水平位移从0.85 cm减少至0.45 cm,沉降量从1.45 cm减少至0.85 cm。

(4) 在暴雨和地震工况下,支护体系的变形表现不同。暴雨条件下,最大水平位移0.87 cm,沉降量1.23 cm;地震条件下(加速度0.30g),最大水平位移达到1.05 cm,沉降量1.55 cm,优化方案能够有效控制变形,未超出设计的安全范围。

(5) 优化设计的支护方案(双排桩+三层锚索)在静态、动态及长期工况下均表现出较高的稳定性。在50年使用寿命内,最大水平位移由初期的0.50 cm增长至1.58 cm,沉降量由0.80 cm增长至2.75 cm。虽变形随时间增加,但在合理范围内,且单位变形量减少的效能高于基础方案。

参 考 文 献

- [1] 魏星,陈睿,程世涛,等. 成都膨胀土地区深基坑降雨稳定性分析与变形预测[J]. 岩土力学,2024,45(增刊1):525-534.
- [2] 王春景,卜一鸣,王金星,等. 动荷载对微型桩深基坑开挖稳定

性的影响[J]. 长江科学院院报,2023,40(9):139-146.

- [3] 赵容舟,梁二雷,姚晓亮,等. 冻融作用对不同初始状态基坑稳定性的影响研究[J]. 冰川冻土,2021,43(5):1480-1488.
- [4] 曾力,蔡云鹏,李明宇,等. 复合地基对临近基坑稳定性影响的数值模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(2):193-201.
- [5] 祁润平. 复杂地质条件下基坑支护设计及其变形控制效果研究[J]. 粉煤灰综合利用,2024,38(2):92-97.
- [6] Jin Yang, Zhao Hanzhe, Zheng Chuanfeng, et al. Effect of steel support cross-section and preloaded axial force on the stability of deep foundation pits[J]. Buildings, 2024, 14(8): 2532.
- [7] 孙克国,甄映州,魏勇,等. 富水岩溶区基坑稳定性影响规律与分析[J]. 现代隧道技术,2023,60(1):149-158.
- [8] 郑刚,甄洁,程雪松,等. 基坑坑底抗隆起稳定性研究现状与展望[J]. 建筑结构,2024,54(20):129-142.
- [9] Liu Leilei, Zhao Guoyan, Liang Weizhang, et al. Hybrid stacking ensemble algorithm and simulated annealing optimization for stability evaluation of underground entry-type excavations[J]. Underground Space, 2024, 17: 25-44.
- [10] 王莹,夏才初,陈孝湘,等. 基于离心试验下软黏土地区窄基坑稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(6):1853-1862.
- [11] Shi Xin, Rong Chuanxin, Cheng Hua, et al. Stability analysis of deep foundation pit with a double-row cast-in-place piles and diagonal steel lattice braces under sloped excavation conditions[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 22761.
- [12] Feng Xiaojian, Liu Yang, Zhou Zhenzhen, et al. The Influence of crack leakage on the stability of foundation pit and the analysis of reinforcement effect of grouting[J]. World Scientific Research Journal, 2024, 10(4).
- [13] 商兆涛,姚家李,夏琴,等. 基于强度折减理论的深基坑稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(9):1209-1215.
- [14] 李红军,冷远,张士龙,等. 井筒式基坑开挖变形特性及稳定性分析[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(8):1395-1403.
- [15] 管大刚,胡志明,郑鹏鹏,等. 开挖顺序及内支撑早期刚度对软土基坑稳定性影响规律[J]. 建筑科学与工程学报,2024,41(2):181-190.
- [16] 肖伟,路轶,杨严禄,等. 考虑尺寸效应的狭窄型基坑稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(10):4105-4112.