

深基坑时空动态响应特性与围护效果评估

Spatiotemporal Dynamic Response Characteristics of Deep Excavations and Retaining Effectiveness Evaluation

陈家春

(福建省建筑轻纺设计院有限公司, 福州 350001)

摘要: 以某市商业综合体深基坑为研究对象, 采取土钉墙、高压旋喷桩、水泥土搅拌桩及隔离桩等多种围护措施, 探讨复杂深基坑时空动态响应特性与围护效果。结果表明: 加固方法成效显著, 其中距离基坑 10、20 与 30 m 处的最大应力降至 27.4、24.7 和 22.6 kPa, 相较于未加固时均下降 40% 以上; 最大水平变形量与竖向沉降值降幅均超 50%。加固措施有效控制了土体应力和变形, 为深基坑工程安全高效施工提供了保障。

关键词: 复杂建筑; 深基坑; 时空动态响应; 围护效果

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0079-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.014

CHEN Jiachun

(Fujian Construction Textile Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Taking a commercial complex deep excavation in a certain city as the research object, this study employs multiple support measures including soil-nailing walls, high-pressure jet grouting piles, cement-soil mixing piles, and isolation piles to investigate the spatiotemporal dynamic response characteristics and support effectiveness of complex deep excavations. The results show that the reinforcement methods achieved significant effects: the maximum stresses at distances of 10, 20 and 30 m from the excavation were reduced to 27.4, 24.7 and 22.6 kPa, respectively, representing a decrease of over 40% compared to the unstabilized condition. The maximum horizontal deformation and vertical settlement values decreased by more than 50%. The reinforcement measures effectively controlled soil stress and deformation, ensuring safe and efficient construction of the deep excavation project.

Key words: complex buildings; deep foundation pit; spatiotemporal dynamic response; enclosure effect

0 引言

随着城市化进程和建设技术的发展, 深基坑工程越来越多。深入研究深基坑开挖过程中的时空动态响应特性, 掌握基坑开挖过程中的力学行为和环

境效应, 对于准确把握工程安全风险至关重要, 同时为围护结构设计提供科学依据, 进而优化施工方案。

目前, 国内外学者在深基坑领域已开展了大量研究工作。索文斌等^[1]引入离散元法, 采用 MatDEM 3D 软件构建模型, 模拟基坑开挖过程中土体和管桩的变形, 评价了基坑支护结构的有效性; 周东波等^[2]对杭州、上海、宁波等地地铁车站深基坑地连墙变形特性进行统计分析, 采用无量纲化处理等方法, 明确了地连墙变形规律及不同地区的变形差异; 李会蕊等^[3]通过 FLAC 3D 软件对比分析土钉墙与复

作者简介: 陈家春 (1978—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向: 建筑结构设计。

收稿日期: 2024-08-19

岩土力学

合土钉墙支护下基坑开挖变形,研究了复合土钉墙对基坑安全的影响;孙九春等^[4]从支撑轴力与软土流变角度研究围护侧向变形控制方法,并结合实际工程验证其效果;安邦超等^[5]通过工程实例,采用修正摩尔-库仑本构模型分析基坑开挖对轨道和电塔的影响,提出变形控制措施,确保地铁运营安全;周惠聪等^[6]通过 Abaqus 软件和扩展有限元理论,研究了基坑开挖对盾构隧道管片裂缝的影响,发现基坑开挖深度和位置对裂缝分布有显著影响;杜建安等^[7]用光纤光格栅传感器监测地连墙与混凝土横撑,并用 FLAC 3D 模拟,发现土方开挖初期地连墙水平位移缓慢增加,基坑中部最大,后期竖向沉降速率逐渐加快;陈晓鹏等^[8]以绍兴地铁一号线工程为背景,建立三维有限元模型模拟基坑开挖及支护结构位移变化,得到地下连续墙最大水平位移的模拟值与实测值误差较小,基坑周边土体沉降计算与实测规律一致但数值略有偏差;杨晶^[9]用广义荷载传递理论分析各阶段桩身轴力及侧摩阻力变化,得出基坑开挖对工程桩产生较大上拔力,最大值在桩身上半部分,使用阶段桩身中段拉力仍大,实际配筋应加大范围的结论;陈扬等^[10]基于中心点法和随机场理论建立多层土弹性模量随机场模型,结合 FLAC 软件构建耦合计算模型,研究表明所建模型准确,考虑空间变异性后基坑变形可控,开挖过程中弹性应变能部分转化为塑性应变能,完成后基坑稳定;卢玉林等^[11]基于弹性地基梁理论,建立地下管线沉降位移计算公式,分析地表中心沉降量和计算长度对管线沉降位移的影响;杜家论等^[12]结合三轴流变试验数据和三维 FEM 模拟瞬时结果,以宁波地铁车站基坑施工为例验证了该方法的可行性;郑明新等^[13]通过建立三维有限元数值模型,分析了不同速度列车动载下邻近既有线路基坑开挖过程中路堤的动变形规律,得出路基动位移随开挖深度变化的趋势及限速控制措施的可行性。

基于此,通过对实际工程的系统监测与深入分析,探讨深基坑开挖过程中土体应力、变形及稳定性的时空变化规律,并构建科学合理的围护效果综合评估方法与指标体系,以期复杂建筑深基坑工程的设计、施工与管理提供技术支持和决策依据。

1 工程案例

1.1 工程

以某商业综合体项目深基坑为例,其周边环境复杂,基坑东侧与道路红线距离约 5 m;西靠多栋高层住宅,最近处距离约 8 m,且地下管线纵横交错。该基坑平面近似矩形,长约 60 m,宽约 30 m,开挖深度达 18 m。从地表起依次为 3 m 厚的杂填土、6 m 厚的粉质黏土、4 m 厚的粉砂以及 5 m 厚的粉质黏土混碎石等。

1.2 加固方案

由于基坑复杂的地质条件及周边环境,采取了围护措施。在距离基坑边缘 2~4 m 范围内,因土体应力变化显著且横向变形较大,采用间距 1.5 m 的土钉墙支护;针对深度在 4~6 m 处土体应力集中明显的情况,采用桩径 0.6 m、桩间距 1.2 m 的高压旋喷桩加固;在基坑底部 1~2 m 深度范围,采用桩径 0.5 m、桩间距 1 m 的水泥土搅拌桩加固,增强基底承载能力;同时,在距离基坑 5~10 m 且靠近周边建筑物和地下管线处设置 1 排桩径 0.8 m、间距 1.5 m 的隔离桩,减少施工对周边环境的影响。

1.3 监测方案

为了精准获取开挖过程中的时空动态响应数据,于平行于基坑周边方向每隔 10 m 布设 1 个监测点,如图 1 所示。在坑壁深度方向每隔 1 m 处钻孔埋设测斜管,并在支撑结构部位安装应变片;在地下管线上方或附近地面设置位移监测点。监测频率根据施工进度动态调整,在开挖初期,各项监测每天进行 1~2 次;随着开挖深度增加和变形速率变化,加密至每天 2~3 次;在关键施工节点或出现异常情况时,每 2~4 h 监测 1 次,确保能及时捕捉到基坑及周边环境的细微变化。

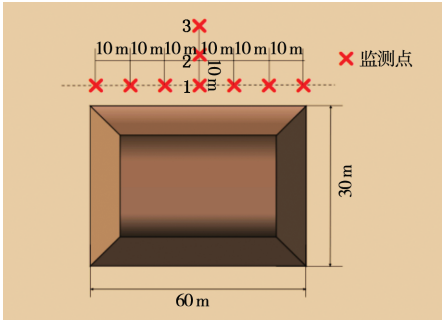


图 1 监测点分布图
Fig. 1 Distribution of monitoring points

2 土体时空动态响应特性分析

2.1 土体应力的时空变化规律

2.1.1 土体应力随时间的变化规律

从图2中可以看出,各监测点的应力值整体上呈现出随着时间的推移先增加后减小的趋势。在施工阶段,前期由于土体所受的初始扰动较小且相对均匀,使得该阶段各监测点的应力值均呈现出缓慢波动上升的趋势,在此阶段各监测点的应力值各增长了2.5、3.1与2.5 kPa。

随着施工进度进入中期,此时各监测点的应力值增长较为迅速。这一阶段,随着基坑开挖深度的大幅增加,土体受到的扰动程度加剧,原有的土体结构平衡被打破,土体之间的摩擦力和黏聚力发生显著变化,导致土体的应力状态快速调整,致使各监测点的应力值快速上升,此阶段各监测点的应力值分别增长了21.4、13.3与8.1 kPa,并分别达到各监测点应力值的最大值。直至后期,由于基坑开挖基本完成,土体的变形逐渐趋于稳定,土体内部的应力调整也逐渐平缓;并且土体在前期受力变形过程中逐渐形成了新的相对稳定的结构,其自身对应力的传递和分散能力有所增强,使得该阶段的应力值出现缓慢下降的趋势,最终各监测点的应力值分别为52.0、45.1与37.2 kPa。

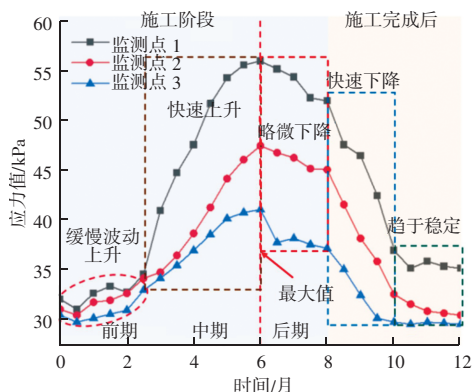


图2 不同监测点应力值随时间的变化曲线

Fig. 2 Curves of stress values at different monitoring points with time

进一步对施工完成后各监测点的应力值变化曲线进行分析。在施工完成初期,由于施工荷载的移除以及土体自身的应力释放等原因,使得各监测点的应力值迅速下降,而随着时间的推移,周边环境与土体之间经过充分的相互作用,各监测点的应力

值逐渐稳定在35.2、30.5与29.6 kPa。随着距施工部位距离的增加,各监测点的应力值呈现出逐渐减小的趋势,各监测点的最大应力值为56.0、47.5与41.1 kPa,监测点2相对于监测点1减小了15.2%,监测点3相对于监测点2减小了13.5%。

2.1.2 土体应力随深度的变化规律

从图3中可以看出各监测点的应力值随着深度的增加呈现出波动变化趋势,并且深度在地下0~2 m时,应力值呈现出缓慢减小的趋势。其原因是由于浅层土体受到上部荷载的影响相对较弱,且土体自身的初始应力状态在浅层范围内的调整较为平缓。而随着深度进一步增加,各监测点的应力值逐渐上升,直至深度为5 m时达到最大值,分别为55.3、46.2与37.6 kPa。其原因是随着深度的递增,土体所承受的上覆荷载不断累积,同时土体的力学性质在这一深度范围发生了相应的变化,导致应力集中现象较为明显。当深度继续增加时,由于深层土体受到周围土体的约束作用以及自身的应力扩散等因素共同作用,使得应力值再次呈现出逐渐减小的趋势,直至10 m处达到最小值50.4、43.0与35.8 kPa。

对比各部位的应力值大小变化规律,可以发现随着距施工部位距离的增加,各监测点的应力值均逐渐减小,并且各监测点的应力值随深度增加逐渐减缓。如监测点1因距离施工部位较近,其应力值随着深度的增加变化范围较大,最大值与最小值相差5.6 kPa;而距离较远处的监测点3的变化范围较小,最大值与最小值仅差2.5 kPa,相对监测点1减小了55.4%,整体变化较为平缓,这充分反映了施工影响在空间上的衰减特性。

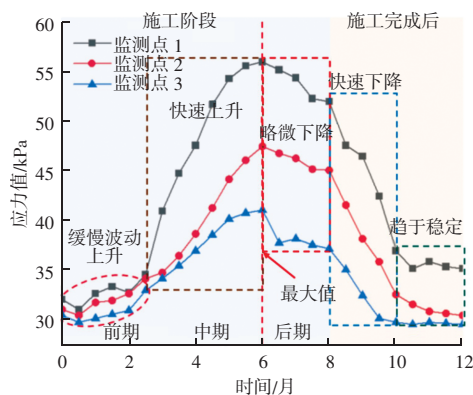


图3 各监测点的应力值随深度的变化曲线

Fig. 3 Curves of stress values at each monitoring point changing with depth

岩土力学

2.2 土体横向变形的时空变化规律

从图4中可以看出,随着施工进度的推进,各监测点的变形量均呈现出先增加而后缓慢波动减小的趋势。在施工初期,各监测点的变形量增长较为缓慢,此阶段各监测点的应力值分别增长了4.15、3.75与2.75 mm。其原因是由于在施工初期,主要进行的是如场地初步平整、小型施工器械和少量施工人员的就位等基础作业,对土体产生的作用力和应力改变较小,土体结构基本维持原有状态。而随着施工进度进入中期,各监测点的变形量增速较快,此阶段各监测点的变形量各增长了8.05、7.45与5.35 mm,占整个施工进度的60%以上。这是由于中期施工进入关键的主体作业环节,大规模的土方开挖作业致使土体的原有平衡被打破,使得土体承受的荷载急剧攀升,进而导致土体结构产生较大幅度的变形。

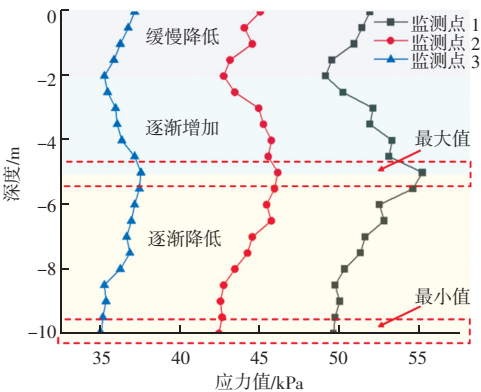


图4 不同监测点位置的变形量变化曲线

Fig.4 Variation curves of deformation at different monitoring points

直至施工进度进入后期,各监测点的变形量增速逐渐降低,直至10月时开始呈现出波动下降的趋势,最终各监测点的变形量分别为12.5、11.4与8.4 mm,这是因为后期施工活动强度逐渐降低,土体在经历前期的变形过程后,其内部结构逐渐趋于新的稳定状态,应力调整也逐渐趋于平缓。对不同监测点的变形量数据进行对比,可以看出,随着距离施工部位距离的增加,各监测点的变形量数据逐渐减小,其中各监测点的最大变形量分别为13.4、12.2与8.7 mm,监测点2相对于监测点1减小了9.0%,监测点3相对于监测点2减小了28.7%。这是由于距离施工部位越远,土体受到施工活动产生的荷载、应力扰动以及振动等影响越

小,土体能够保持相对较为稳定的状态,从而变形量也相应减小。

2.3 土体竖向沉降的时空变化规律

从图5中可以看出,各监测点的沉降值整体上呈现出随施工进度的推进而逐渐增加的趋势。在施工初期,由于土体受前期施工活动的干扰程度较低,应力状态的变化相对缓和,故而沉降发展趋势较为缓慢。而当施工进入中期时,各监测点的沉降速率显著加快,各部位的沉降增量分别达到4.48、3.97与2.93 mm。这是因为中期施工活动强度增大,使得土体承受的荷载显著增加,导致土体结构发生较大变形,从而沉降加速,其增长值占整个施工进度的50%以上。直至8月之后,随着施工活动的减少以及土体自身的逐渐稳定,各部位的沉降值逐渐趋于平稳状态,最终沉降值分别为8.3、6.9与5.0 mm。

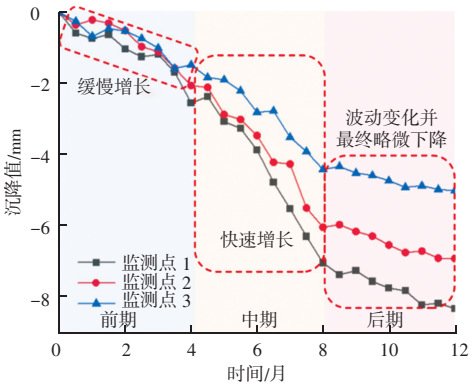


图5 各监测点的竖向沉降随时间的变化曲线

Fig.5 Change curve of vertical settlement at each monitoring point with time

3 深基坑围护效果的综合评估方法与指标体系

3.1 土体应力的时空变化规律

从图6(a)不同时间的变化曲线可以看出,采取加固措施后各部位的应力得到了显著的控制,加固后各部位的最大应力值分别为27.4、24.7与22.6 kPa,相对于未加固时的56.0、47.5与41.1 kPa下降了51.1%、48%与45%。其原因主要是由于加固措施中的锚杆支护,锚杆深入土体内部,将土体与稳定的土体或岩体相连,通过其锚固力分担了土体所受的外部荷载,从而降低了土体的应力集中程度,使应力随时间的增长得到抑制。

从图6(b)可以看出,在深度方向上,各监测

点的应力值变化趋势同样得到了有效控制,变化范围大幅缩小,其中加固后各监测点的变化范围仅为 2.5、2.0 与 1.2 kPa。其原因是由于采用的深层搅拌桩加固,增强了土体的整体性和承载能力,进而限制了应力在深度方向上的无序变化,使其最大值分别从 55.3、46.2 与 37.6 kPa 降至 29.4、24.5 与 20.7 kPa,分别下降了 46.8%、47% 与 44.9%。

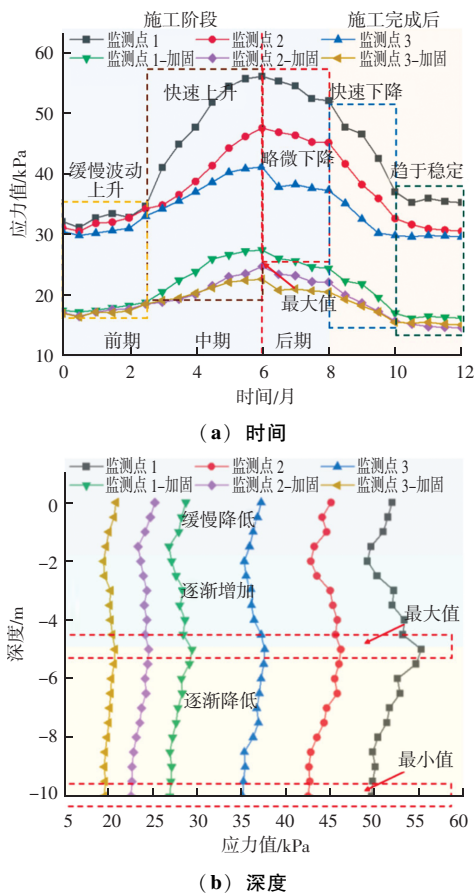


图6 加固前后各部位的应力值随时间与深度的变化曲线
Fig. 6 Curves of stress values of each part with time and depth before and after joint reinforcement

3.2 土体变形的时空变化规律

从图7(a)可以看出,采取加固措施前后,各部位的水平变形量呈现出相同的变化趋势,均是在初期缓慢波动上升,而后增速逐渐增加,直至后期波动变化并略微降低。而不同的是采用该加固措施后各部位的变形量的增长趋势得到了有效控制。其中,土钉墙在这一过程中发挥了关键效能。土钉植入土体后,与土体紧密结合形成有机整体,凭借土钉与土体间的摩擦力和黏结力,对土体侧向位移形成有效约束,抑制了水平变形,使各部位最大变形从

13.4、12.2 与 8.7 mm 分别降至 6.0、5.3 与 4.2 mm,分别下降了 55.2%、56.6% 和 51.7%。

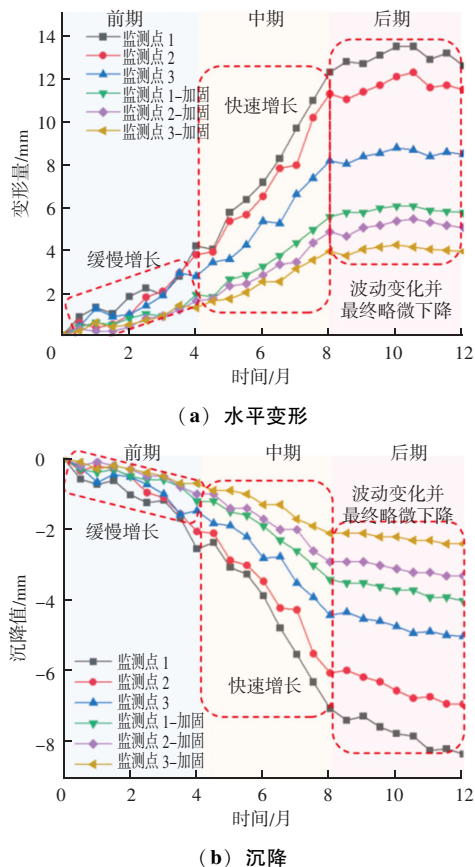


图7 加固前后各部位的水平变形与沉降变化曲线
Fig. 7 Curve of horizontal deformation and settlement before and after reinforcement

如图7(b)所示,采用加固措施前后,各部位沉降值均呈现随施工进度推进而逐渐增加的趋势,但加固后沉降值降低。搅拌桩提升了土体的承载能力与稳定性,使其能够更为有效地承受上部荷载,减少了沉降。经加固后,各部位沉降值分别为 4.0、3.3 与 2.4 mm,相较于未加固时的 8.3、6.9 与 5.0 mm 分别下降了 51.8%、52.2% 和 52.0%。

4 结论

以某商业综合体深基坑为例,详细阐述深基坑时空动态响应特性与围护效果评估。通过对其多方面数据的监测收集,并进行全面且深入的对比分析,得出以下结论:

(1) 在施工过程中,土体应力、横向变形与竖向沉降呈现特定规律。土体应力先增后减,随深度

岩土力学

波动变化；横向变形先增后减；竖向沉降逐渐增加。且随着距施工部位距离增加，应力、变形和沉降值均逐渐减小，反映出施工影响在空间上的衰减特性。

(2) 针对基坑复杂状况，制定全面加固方案。在 2~4 m 范围用土钉墙应对土体应力与横向变形；4~6 m 深度以高压旋喷桩处理应力集中；基坑底部用水泥土搅拌桩增强承载；在 5~10 m 靠近建筑及管线处设隔离桩，降低施工对周边环境的影响。

(3) 采用多种加固措施后，土体应力和变形得到有效控制。各部位最大应力下降超 40%，水平变形量与竖向沉降值降幅均超 50%。锚杆支护抑制应力增长，深层搅拌桩限制应力在深度方向变化，土钉墙约束水平变形，搅拌桩提升土体承载减少沉降，为深基坑安全高效施工提供保障。

参 考 文 献

[1] 索文斌, 刘春, 施斌, 等. 深基坑 PCMW 工法开挖过程离散元数值模拟分析 [J]. 工程地质学报, 2017, 25 (4): 920925.

[2] 周东波, 梅源, 刘子扬, 等. 东部沿海软土车站深基坑开挖地连墙变形规律 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (12): 41-46, 54.

[3] 李会蕊, 姚华, 孔锋. 复合土钉墙支护技术在建筑深基坑中的应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 18-22.

[4] 孙九春, 白廷辉. 软土地铁深基坑开挖过程中围护侧向变形控

制方法研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39 (增刊 2): 308-317.

[5] 安邦超, 姜波, 罗谢辉, 等. 深基坑开挖对邻近轨道运营交通结构的影响分析 [J]. 交通科技, 2024 (6): 109-115.

[6] 周惠聪, 黄阜, 聂波浪, 等. 基坑开挖诱发邻近盾构隧道管片开裂机理研究 [J]. 交通科学与工程, 2024, 40 (6): 7481.

[7] 杜建安, 李腾, 杨松松, 等. 深大基坑开挖过程中地下连续墙位移与应力监测研究 [J]. 太原理工大学学报, 2020, 51 (6): 900-905.

[8] 陈晓鹏, 陈士军, 吴烈, 等. 绍兴地铁一号线深基坑开挖过程数值分析 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2022, 36 (4): 444-451.

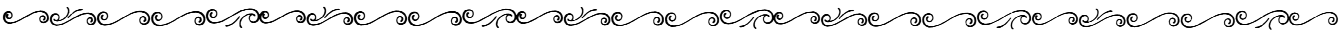
[9] 杨晶. 软土地区某深基坑开挖过程中抗拔桩受力分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (增刊 2): 861-867.

[10] 陈扬, 袁宗义, 梁禹. 考虑土体空间变异性的管廊基坑开挖过程中变形及能量演化特征分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (17): 7127-7134.

[11] 卢玉林, 何金泽, 陈晓冉, 等. 基坑开挖过程中埋地管线沉降位移解析计算 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51 (2): 144-154.

[12] 杜家论, 范建军, 王颖轶, 等. 流变性地层基坑开挖过程中土体长时位移预测 [J]. 应用力学学报, 2016, 33 (5): 749753.

[13] 郑明新, 刘家桦, 杨继凯, 等. 墩台基坑开挖过程中列车动载对路堤的动变形分析 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61 (5): 40-45.



E-mail: fmhzhly@163.com