

考虑深基坑不同施工阶段对临近建筑物沉降作用的影响分析

李景磊, 徐子军, 杨超法, 左伏谦, 王 强, 胡江南, 闫 刚, 吕先放

中建八局第一建设有限公司基础设施公司, 山东 济南

收稿日期: 2025年7月21日; 录用日期: 2025年8月11日; 发布日期: 2025年8月22日

摘 要

深基坑工程的施工会引起基坑周边土体应力场发生显著变化, 进而引起临近建筑物发生显著沉降作用。以济南市某深基坑工程为例, 建立环临近建筑物闭合水准监测网并对施工全过程进行持续监测, 探究了自放坡开挖至主体结构施工完成全周期内的临近建筑物沉降演化规律, 分析了基坑不同施工阶段对临近建筑物沉降量与差异沉降作用的影响程度。监测数据表明: 临近建筑物沉降将经历缓慢增长期-急剧增长期-稳定平台期-二次增长期-趋于收敛期的演化曲线, 分别对应降水、放坡开挖、围护结构施工、基坑开挖、主体结构施工五个典型施工阶段, 产生的沉降量与最大差异沉降量分别为4.05~7.20 mm、7.18~14.90 mm、1.08~1.61 mm、7.51~10.67 mm、1.14~1.83 mm和3.29 mm、7.72 mm、0.72 mm、4.71 mm与1.09 mm, 差异沉降量与沉降速率均满足相关规范要求; 基于沉降演化规律与数据分析可知, 应重点关注放坡开挖阶段临近建筑物各区域与基坑土方开挖阶段临近建筑物远离基坑区域的沉降监测, 并做好预警与加固处置方案。本文研究成果可为城市深基坑工程施工组织与其他类似市政工程施工提供一定的借鉴与参考。

关键词

建筑工程, 深基坑工程, 建筑物保护, 沉降观测, 沉降点布置, 控制

Analysis of Settlement Effects on Adjacent Structures during Various Construction Stages of Deep Excavation Projects

Jinglei Li, Zijun Xu, Chaofa Yang, Fuqian Zuo, Qiang Wang, Jiangnan Hu, Gang Yan, Xianfang Lyu

Infrastructure Company, The First Company of China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Jul. 21st, 2025; accepted: Aug. 11th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

文章引用: 李景磊, 徐子军, 杨超法, 左伏谦, 王强, 胡江南, 闫刚, 吕先放. 考虑深基坑不同施工阶段对临近建筑物沉降作用的影响分析[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 2027-2038. DOI: 10.12677/hjce.2025.148221

Abstract

The construction of deep foundation pit projects can cause significant changes in the stress field of the surrounding soil, which in turn leads to notable settlement of adjacent buildings. Taking a deep foundation pit project in Jinan as an example, a closed leveling monitoring network around adjacent buildings was established, and continuous monitoring was carried out throughout the construction process. The settlement evolution law of adjacent buildings during entire construction from slope excavation to the completion of the main structure was explored, and the influence degrees of different construction stages of the foundation pit on the settlement and differential settlement of adjacent buildings were analyzed. The monitoring data show that the settlement of adjacent buildings will follow an evolution curve of slow growth period, rapid growth period, stable platform period, secondary growth period, convergence tending period, corresponding to five typical construction stages: dewatering, slope excavation, retaining structure construction, foundation pit excavation, and main structure construction respectively. The settlement amounts and maximum differential settlement amounts generated in these five stages are 4.05~7.20 mm, 7.18~14.90 mm, 1.08~1.61 mm, 7.51~10.67 mm, 1.14~1.83 mm and 3.29 mm, 7.72 mm, 0.72 mm, 4.71 mm, 1.09 mm respectively. Both the differential settlement amount and the settlement rate meet the requirements of relevant specifications. Based on the settlement evolution law and data analysis, it is necessary to focus on the settlement monitoring of different areas of adjacent buildings during the slope excavation stage and the area of adjacent buildings far from the foundation pit during the foundation pit earth excavation stage, and prepare early warning and reinforcement disposal plans. The research results of this paper can provide certain references for the construction organization of urban deep foundation pit projects and other similar municipal engineering constructions.

Keywords

Building Engineering, Deep Excavation, Structure Protection, Settlement Monitoring, Settlement Point Layout, Control

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

随着我国城市建设的不断扩张与发展,城市土地资源日益紧张,城市规划者将地下空间的集约化开发与高效利用提升至战略高度[1]-[3]。深基坑工程作为城市地下空间(如交通枢纽、商业综合体、地下管廊等)开发的核心技术,近年来在技术创新、工程规模以及配套设施完善等方面取得了显著进展[4]。然而,深基坑工程施工本质上是扰动原始地应力场的过程,土方开挖引起的大规模卸荷作用将打破基坑周边土体原有的应力平衡状态,诱发土体应力重分布与变形响应[5],进而造成临近建筑物发生较大差异沉降、整体倾斜与基础失效等不利影响,降低其使用质量与服役寿命[6]。

因此,本文以山东省济南市某深基坑工程为例,构建多点位的闭合水准监测网对深基坑施工全过程对临近建筑物造成的沉降作用开展实时监测,深入分析不同施工阶段(降水、放坡开挖、围护结构施工、基坑开挖、主体结构施工)对临近建筑物的沉降作用。同时,深入分析深基坑施工过程中临近建筑周边产生的累计沉降量、阶段沉降量、沉降速率及差异沉降演化规律,建立预警机制与相关加固预案[7],有效

保障结构的运营安全与结构耐久性。研究结论可指导后续相关深基坑工程的动态风险评估与施工方案优化，有效保障施工安全与周边建筑物稳定，具有至关重要的工程实践意义。

2. 项目背景

2.1. 工程概况

济南市某大型地下空间工程施工基坑全长 453 m，宽 63.5 m，属典型的深基坑工程，施工区域自原地面向下平均开挖深度约 20.3 m，计划采用明挖顺做法进行施工，围护结构由地下连续墙 + 两道混凝土支撑 + 钢倒撑组成。

基于本项目深基坑占地面积与开挖深度较大，土方总挖方数量达 550,000 m³，施工过程中围护结构的施工需配合土方开挖与基坑内外降水作业穿插进行，需重点观测基坑围护结构与周边土体的状态与变形情况，开展不同施工阶段下周边建筑物沉降现象的实时监测与数据分析，并依据相关规范与标准及时发布预警[8] [9]。

2.2. 周边建筑物基本情况

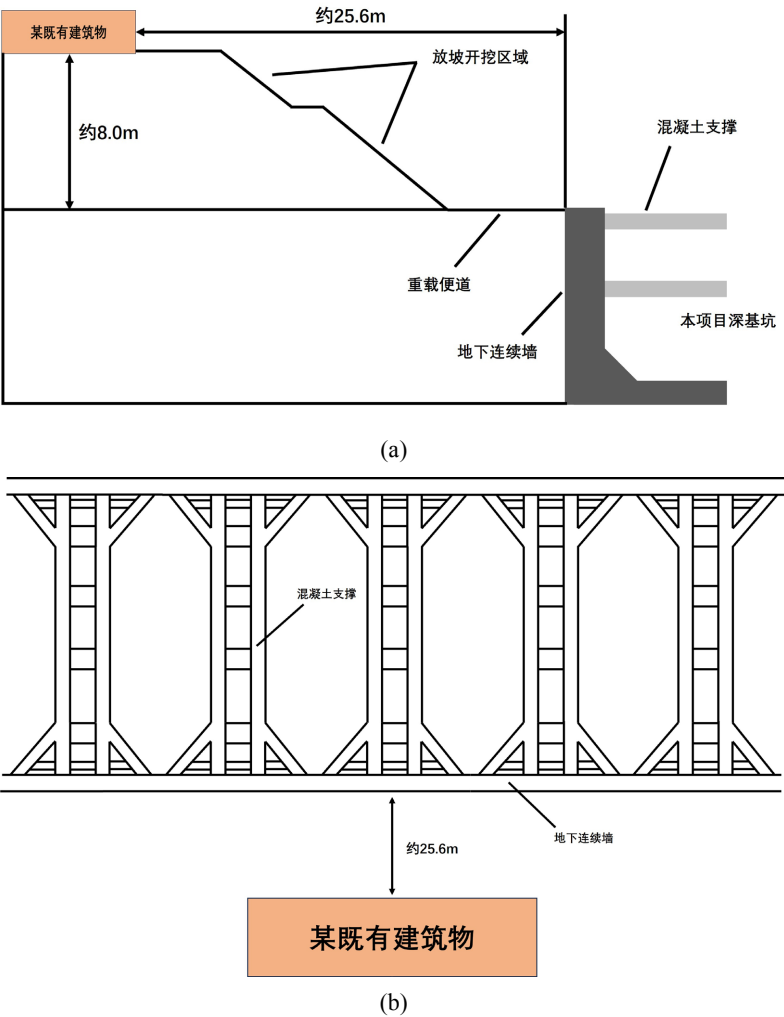


Figure 1. Relative position of existing building and deep foundation pit area
图 1. 某既有建筑物与本项目深基坑施工区域相对位置

某既有建筑物(以下简称建筑物)位于深基坑施工点西侧约 25.6 m, 在基坑施工阶段需保持正常运营。该建筑物地上共计三层, 局部四层, 东西长 29.5 m, 南北宽 38.2 m, 总建筑高度为 15.60 m; 安全等级为一级, 设计使用年限为 50 年。针对该建筑物与深基坑施工场地距离短、地下水位波动大、周边管线分布密集复杂与施工工期紧等不利因素, 将该建筑物列为本项目深基坑施工扰动的重点监测与保护对象并对其周边地表进行实时沉降监测, 建筑物与深基坑施工区域相对位置如图 1 所示, 同时做好相应预警与处置方案, 确保其在施工过程中的稳定运营。

2.3. 现场地质及水文条件

经过前期地质勘察与数据分析, 本项目深基坑施工区域地层岩性主要为第四系全新统人工素填土、杂填土及填筑土, 冲积粉质黏土、粉土、粉细砂, 第四系上更新统冲积粉质黏土等构成, 土质松散含水量高, 分布较为复杂, 地下水位 3~6 m, 具体地质条件与土层分布见下表 1 所示。

Table 1. Soil distribution in the construction area of deep foundation pit
表 1. 本项目深基坑施工区域土质分布

土层名称	分布厚度	重度 γ (kN/m ³)	内摩擦角 φ (°)	压缩模量 E_s (MPa)
1-2 杂填土	1~2 m	18.5	15	5.2
2-1 淤泥质黏土	1.5~3.0 m	18.2	12	3.8
2-2-2 粉质黏土	2.8~7 m	19.0	18	15.0
2-3-1 粉土	7.1~14.5 m	19.6	25	10.6
3-2-3 粉质黏土	13.5~25.6 m	20.2	18	15.0

2.4. 预警机制与处置措施

2.4.1. 预警机制

在开工前或施工初期建立多源监测系统并同步设定预警机制, 多源监测系统主要包括临近建筑物沉降监测、地表沉降监测、边坡监测、大气环境监测与地下水位监测等, 通过人工采集与自动采集结合的方式建立各监测指标数据库, 安排专人进行数据分析并根据监测结果与既定预警机制开展应急处置, 沉降监测预警机制与处置措施如下表 2 所示。

Table 2. Sinking monitoring-warning mechanism and handling measures
表 2. 沉降监测预警机制与处置措施

预警级别	预警阈值	处置措施
黄色预警	沉降速率 > 3 mm/d 或累计沉降 > 20 mm	人工复核并加密相关指标监测频率
橙色预警	沉降速率 > 5 mm/d 或累计沉降 > 30 mm	暂停开挖并实施动态注浆补偿
红色预警	沉降速率 > 8 mm/d 或累计沉降 > 40 mm	立即停工并进行应急支护

2.4.2. 处置措施

考虑本项目施工环境与控制要点, 确定边坡注浆加固为主要处置措施, 注浆加固通过向边坡土体中注入水泥浆或其他化学浆液, 填充土体中的孔隙和裂隙, 改善边坡内部土体的渗透性, 提高边坡密实度和强度, 显著增加边坡的抗滑能力和稳定性进而降低临近建筑物的沉降作用。

本项目中, 注浆加固主要分五步进行, 分别是测量放线、钻孔、浆液配制、注浆与封控, 若现场监测

数据达到橙色预警或接近橙色预警量级时，现场指挥人员应立即暂停相关区域施工作业并启动处置措施，钻孔点位应在相邻混凝土支撑的跨中区域加密分布，其余区域尽可能均匀或对称分布，钻孔完成后依次检查孔深、孔径与孔斜等指标并做好记录，按照既定配合比制定水泥浆液，本项目采用 425 水泥并掺入外加剂与减水剂，搅拌均匀后使用注浆管插入钻孔底部进行注浆，注浆压力控制在 1~2 MPa 范围内，注浆过程应全程记录。注浆结束后，应使用水泥砂浆或其他密封材料进行封控作业，并安排专人进行日常巡视，监测人员加密该区域监测频次，判定边坡注浆加固与沉降作用抑制效果。

3. 监测方案

3.1. 监测方法与设备

本项目针对该建筑物开展沉降监测作业，监测外业选择电子水准仪测附合线路[10][11]，通过记录整理施工各阶段建筑物不同点位的高程变化与发展趋势，分析施工各阶段对建筑物的沉降影响，判断建筑物所处外部环境是否安全。选用的仪器型号为天宝 DINI03 型电子水准仪，其性能优越、操作便捷，每公里往返水准观测精度可达 0.3 mm，最小显示 0.01 mm，15'内自动补偿，安平精度±0.2"。

3.2. 沉降监测点布设

为满足该建筑物沉降监测的要求，依据相关工程测量规范(如《工程测量标准》GB 50026)，前期在基准点布设环节进行了严格选址。选定距离本项目深基坑开挖影响区边界 ≥100 m 的某稳定地质单元 JZ01 作为基准点。该点位处于显著工程扰动影响范围之外，经地质勘察确认其地质构造稳定、地基承载力可靠。在建筑物本体及邻近区域，依据等精度、全覆盖的布设原则，系统布设了 14 处沉降监测点，最终构建形成由 1 个基准点和 14 个监测点组成的闭合水准监测网，监测点之间间隔 7~10 m，均匀分布。

为提升观测精度与可靠性，水准测量采用闭合水准路线方法进行[12]，具体观测方案设计为 15 个独立测量区段。测量人员自己知高程控制点出发，沿预先设计的最优闭合路径，按顺序对该建筑物外围的 14 个监测点进行等精度逐站观测，最终闭合至起始基准点，形成完整的水准闭合环。该网络拓扑结构可有效控制测量累积误差，并通过闭合差检核保障沉降监测数据的整体可靠性。周边建筑物监测网各点位分布与相对位置如图 2 所示。

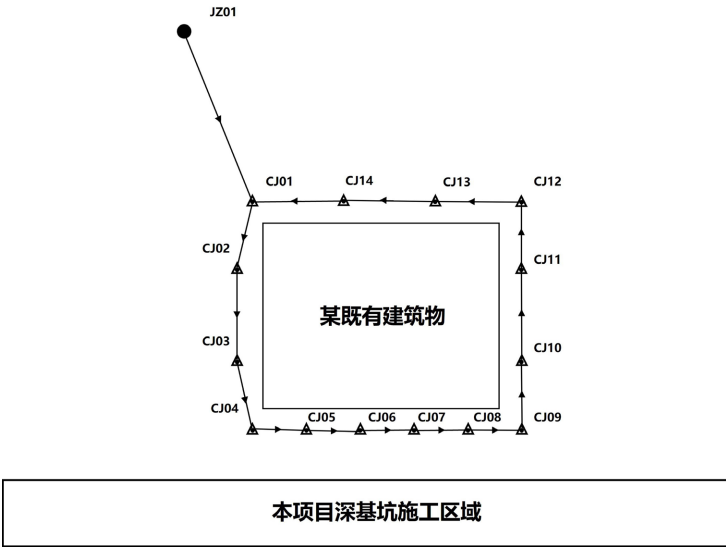


Figure 2. Layout diagram of building monitoring points
图 2. 建筑物监测点示意图

3.3. 施工阶段与监测频率

根据本项目深基坑施工组织与施工方案并借鉴既有研究成果[13]，本文将深基坑施工全过程划分为五个关键阶段开展沉降监测，分别为降水作业，持续时间约 120 天、放坡开挖作业，持续时间约 80 天、围护结构施工作业，持续时间约 100 天、基坑土方开挖作业，持续时间约 140 天及主体结构施工作业，持续时间约 150 天，各施工阶段持续时间与监测频率如下表 3 所示。

Table 3. Duration of each construction stage and monitoring frequency for deep foundation pit
表 3. 本项目深基坑各施工阶段持续时间与监测频率

施工阶段	施工预计持续时间(天)	监测频率(次/周)	监测设备
降水作业	120	7	天宝 DINI03 型电子水准仪
放坡开挖作业	80	14	天宝 DINI03 型电子水准仪
围护结构施工作业	100	7	天宝 DINI03 型电子水准仪
基坑土方开挖作业	140	14	天宝 DINI03 型电子水准仪
主体结构施工作业	150	7	天宝 DINI03 型电子水准仪

4. 沉降监测结果分析

4.1. 沉降演化趋势

为了深入分析基坑开挖对建筑物沉降的影响，针对三个典型区域(建筑物靠近基坑侧、远离基坑侧、垂直基坑侧)，在监测网中分别选取六个沉降监测点位(CJ05、CJ08 建筑物靠近基坑侧)、(CJ13、CJ14 建筑物远离基坑侧)和(CJ03、CJ11 建筑物垂直基坑侧)进行数据整理与分析。由图 3 可以看出，随着本项目深基坑工程施工工作的开展，建筑物各监测点位均发生了明显沉降，沉降量在降水阶段、放坡开挖阶段、围护结构施工阶段、基坑土方开挖阶段、主体结构施工阶段存在较大的差异。

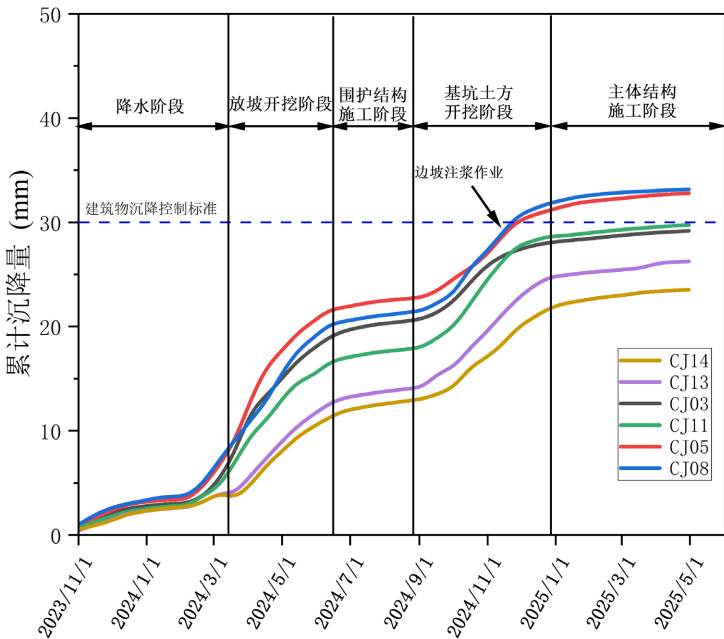


Figure 3. The settlement evolution patterns of each monitoring point
图 3. 建筑物各监测点沉降演化规律

主体结构施工接近完成时,各点位总沉降量为 23.54~33.18 mm,值得关注的是,根据《建筑基坑工程监测技术标准》[14],靠近基坑侧两个监测点位沉降在主体结构施工中后期超过控制标准 30 mm,同时呈现持续增长的趋势,现场作业人员立即组织边坡注浆加固作业,有效延缓该区域的沉降速率,将该区域的总沉降量控制在 33 mm 左右并迅速趋于收敛,建筑物其余各点位差异沉降量均满足现有规范,在深基坑施工过程中的沉降控制达到预期要求,深基坑施工未对其结构稳定与正常运转产生较大不利影响。

值得关注的是,实际沉降量和演化规律与施工前预期值基本吻合,沉降作用受土体卸荷与应力状态变化影响较大。施工各阶段影响程度由大到小依次为放坡开挖阶段、基坑土方开挖阶段、降水阶段、主体结构施工阶段、围护结构施工阶段。各点位沉降量均随施工阶段的推进呈现缓慢增长-急剧增长-稳定平台-二次增长-趋于收敛五个阶段。这表明开挖作业对于土体结构整体应力平衡破坏大,复杂的施工组织与土方开挖作业极易引起基坑下方与周围土体受力状态发生较大变化,造成临近建筑物的不均匀沉降[15]。

4.2. 沉降量分析

针对不同施工阶段,分别计算不同点位的沉降量。根据图 4 所示数据可以看出,在基坑降水阶段,建筑物各点位沉降量为 4.05~7.20 mm;其中 CJ08 点位沉降量最大,为 7.20 mm,CJ13 点位沉降量最小,为 4.05 mm,沉降量随着距离基坑距离的增加而显著降低,这是由于该阶段降水井大多分布于基坑内部与基坑边缘区域,地下水位的降低造成地基承载力衰减,进而产生沉降作用。

随着降水作业的结束,沿坡顶依次开展放坡开挖作业,现场开挖深度约 5~8 m,该作业导致建筑物周围沉降进入急剧增长期,各点位沉降量为 7.18~14.9 mm,沉降量为降水作业阶段的 1.75~2.57 倍,较降水作业阶段增长 3.09~8.33 mm,其中建筑物靠近基坑侧点位(CJ05,CJ08)沉降速率显著增大,该作业期间最大沉降点位为 CJ08,最小沉降点位为 CJ14。

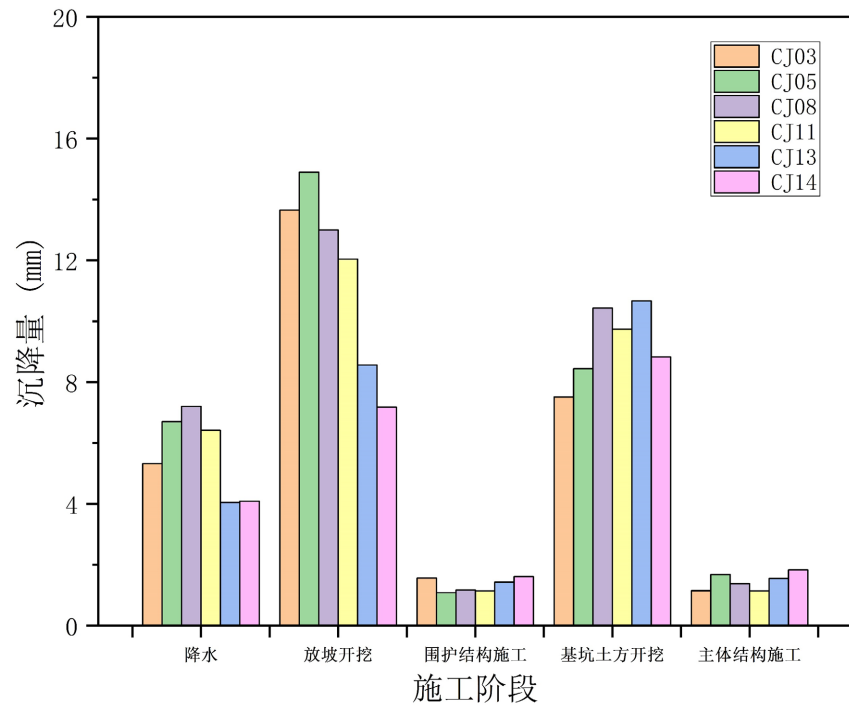


Figure 4. Comparison of settlement amounts in each construction stage
图 4. 各施工阶段沉降量对比

随着放坡开挖作业接近尾声与围护结构施工的开展, 2 道混凝土支撑 + 地下连续墙的围护结构组合使得其各点位沉降速率均发生显著降低, 沉降发展进入稳定平台期, 期间沉降量仅为 1.08~1.61 mm, 相较于放坡开挖阶段有了显著降低, 这是由于围护结构的施工与混凝土强度的形成开始对基坑周边土体发挥约束作用, 可显著提高基坑及其周边建筑物的稳定性, 降低其沉降作用。

围护结构全部完成后, 根据明挖顺做法自南向北开展基坑土方流水开挖作业, 该阶段共持续约 89 天, 该阶段内导致建筑物各监测点沉降量产生了明显的二次增长, 各点位沉降量为 7.51~10.67 mm, 由于该阶段围护结构强度已形成, 沉降速率较第一次放坡开挖作业时有明显降低, 除远离基坑侧点位外, 其余点位沉降量降低率达到 19.1%~44.9%, 沉降作用得到了显著控制。

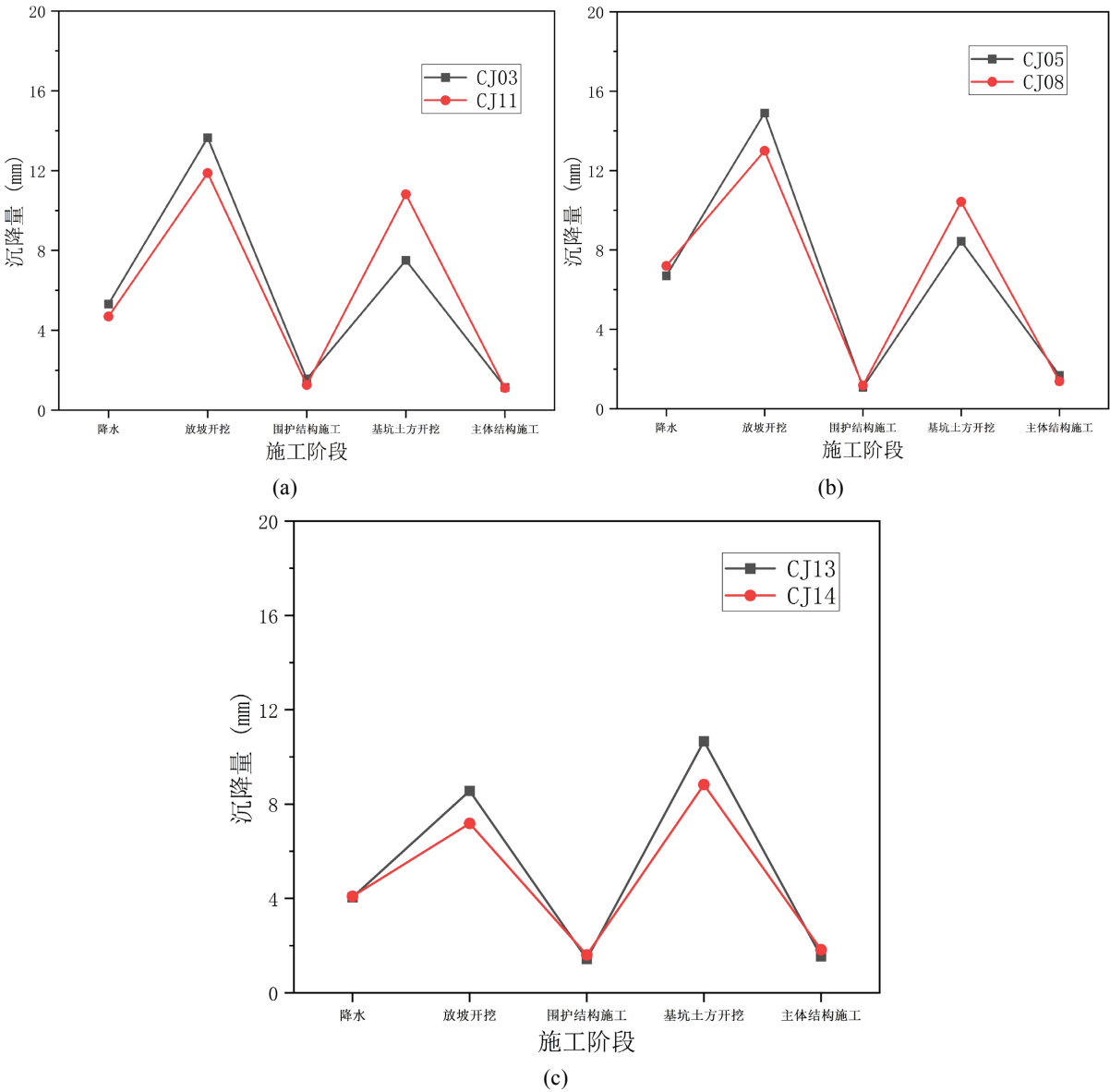


Figure 5. Comparison of settlement in different areas of the building during various stages

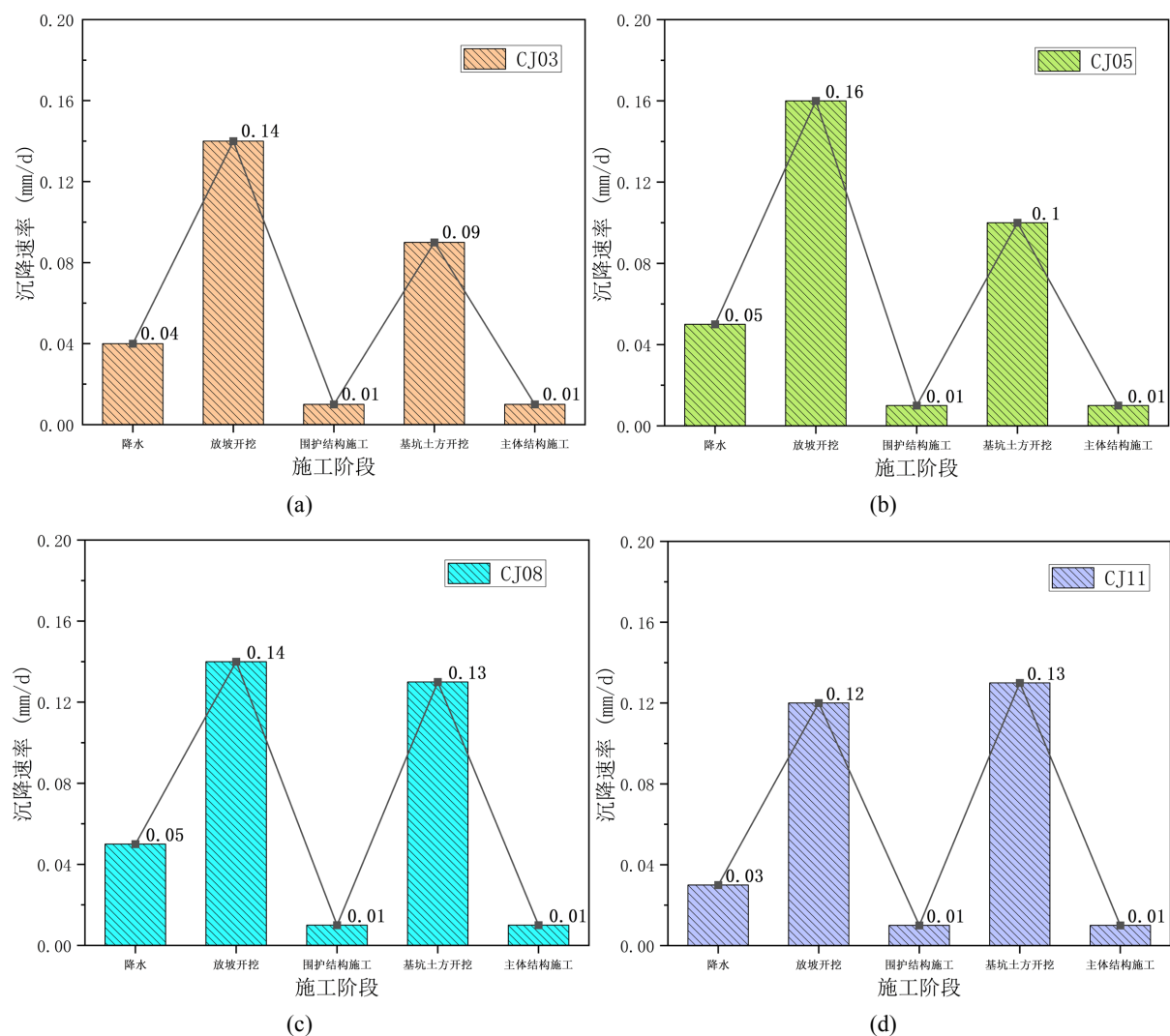
图 5. 建筑物不同区域各施工阶段沉降量对比

主体结构施工阶段持续约 126 天, 期间主要进行底板、中板、顶板与侧墙的分层浇筑施工, 随着主

体结构的施工不断进行,可作为永久荷载作用于深基坑围护结构,使得建筑物下方土体荷载达到平衡状态,该阶段各点位沉降量为 1.15~1.83 mm,沉降作用趋于收敛,此时建筑物周围土体处于平衡与稳定状态,施工扰动对其造成的沉降作用基本结束,沉降量趋于收敛。

由图 5(a)~(c)可以看出,同一区域内不同监测点位在相同施工阶段产生的沉降量差异较小,通常在 2 mm 内,最大为基坑土方开挖阶段造成的 CJ03 与 CJ11 点位沉降量差异,为 3.51 mm。值得关注的是,由图 5(c)可以看到,在建筑物远离基坑侧,则呈现相反的沉降趋势,放坡开挖阶段产生的沉降量小于基坑土方开挖阶段,沉降量由 7.18~8.56 mm 增长至 8.83~10.67 mm,增长率为 22.9%~24.6%,分析其原因大致为放坡开挖阶段距离该区域相对较远,造成靠近基坑侧产生较大的土体应变与沉降作用,围护结构施工结束后,由于建筑靠近基坑侧受到围护结构提供的反向约束作用,基坑土方开挖施工造成的沉降作用得到一定控制,沉降量有所降低;远离基坑侧区域则随着开挖深度的增加,基坑内部的应力释放和地下水位变化共同作用对该区域产生了更显著的负面影响,导致产生了相反的沉降趋势,因此,在围护结构施工结束转入基坑土方开挖施工阶段后,应重点监测远离基坑区域的地表沉降现象,超前开展相应的预警机制与处置措施,避免建筑物产生较大的差异沉降。

4.3. 各阶段沉降速率分析



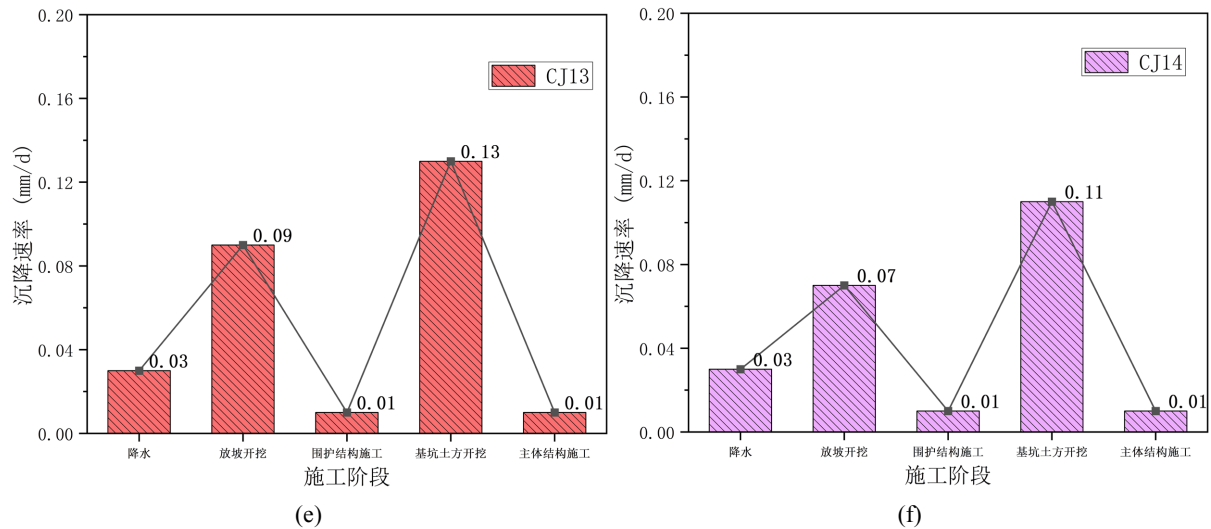


Figure 6. The settlement rates during different construction stages
图 6. 不同施工阶段沉降速率

将不同监测点位建筑物产生的沉降量与施工阶段持续时间进行汇总分析, 计算不同施工阶段的沉降速率, 由图 6 可知, 所有监测点位均呈现两个明显的沉降峰值(沉降速率 ≥ 0.1 mm/d), 分别对应放坡开挖阶段与基坑土方开挖阶段, 与上文分析结论相同, 其中最大沉降速率发生在 CJ05 点位的放坡开挖阶段, 沉降速率达到 0.16 mm/d, 低于规范中 0.2 mm/d 的安全限制, 施工期沉降满足相应规范要求。

由图 6 可以看出, 建筑物监测点位在各施工阶段沉降速率均满足现有规范, 沉降峰值出现在放坡开挖阶段与基坑土方开挖阶段, 沉降速率分别为 0.07~0.16 mm/d 和 0.09~0.13 mm/d, 应在施工过程中重点关注这两个阶段的沉降监测, 在施工过程中应当严格按照现有规范中的强制性做法, 确保围护结构强度完全形成后才可进行基坑土方开挖作业;

在降水施工阶段, 沉降速率维持在 0.03~0.05 mm/d, 该施工阶段虽未进行土方开挖作业, 但降水作业导致土体应力场发生显著变化, 地基承载力衰减, 造成建筑物发生沉降, 在进行相关深基坑降水作业时, 必须加强降水速率控制;

在围护结构施工阶段与主体结构施工阶段, 各点位沉降速率均维持在 0.01 mm/d 上下, 可以看出这两个阶段处于沉降发展稳定期, 建筑物几乎不发生沉降作用, 沉降速率远低于安全标准, 且在主体结构施工进入尾声阶段后, 沉降趋于收敛。

4.4. 差异沉降分析

上节对于建筑物在本项目深基坑施工中的沉降趋势、不同施工阶段沉降量和沉降速率进行了分析, 本节将基于沉降监测数据, 分析不同阶段、位置处建筑物的差异沉降量。由图 7(a)~(e)可以看出, 放坡开挖阶段建筑物差异沉降量最大, 达到 7.72 mm, 其中最大沉降点位为 CJ05, 沉降量为 14.9 mm, 最小沉降点位为 CJ14, 沉降量为 7.18 mm; 基坑土方开挖阶段差异沉降量次之, 达到 4.71 mm, 最大沉降点位 CJ09 为 12.22 mm, 最小沉降点位 CJ01, 沉降量为 7.65 mm。综上, 可以看出造成建筑物沉降量最大、沉降速率最快的两个阶段, 其造成的差异沉降量同样较大; 围护结构施工阶段与主体结构施工阶段建筑物差异沉降量较小, 分别为 0.72 mm 与 1.09 mm, 可以看出这两个阶段由于未对基坑周边应力场产生较大扰动, 产生的差异沉降基本在 1 mm 范围内, 未对建筑物造成不利影响。

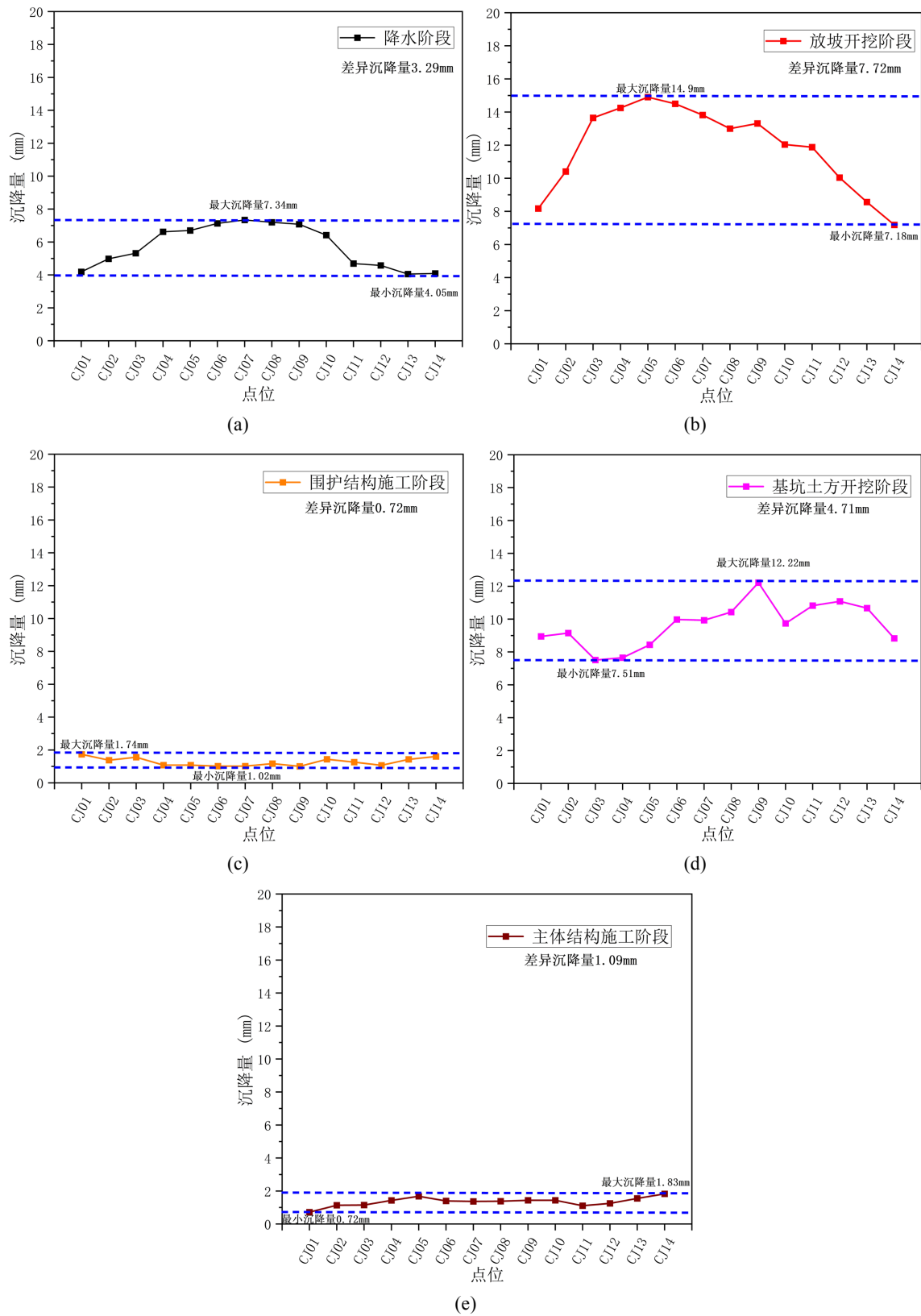


Figure 7. Differences in settlement during different construction stages
图 7. 不同施工阶段差异沉降量

基于施工各阶段建筑物产生的差异沉降监测数据,放坡开挖阶段作为最不利情况,其产生的差异沉降量为 7.72 mm,依然满足相关技术规范要求的 10 mm 要求,工程施工控制总体有效,可确保建筑物的稳定运营。

5. 结论

通过在深基坑工程周边建筑物建立闭合水准监测网并对施工全过程进行持续监测与数据分析,得出以下主要结论:

1) 随着深基坑工程依次进入降水、放坡开挖、围护结构施工、基坑开挖、主体结构施工阶段,周边建筑物沉降经历缓慢增长期-急剧增长期-稳定平台期-二次增长期-趋于收敛期五个典型发展阶段;

2) 降水、放坡开挖、围护结构施工、基坑开挖、主体结构施工阶段五个施工阶段产生的沉降量分别为 4.05~7.20 mm、7.18~14.90 mm、1.08~1.61 mm、7.51~10.67 mm 和 1.14~1.83 mm,应重点关注放坡开挖阶段与基坑开挖阶段,并做好预警与处置措施准备工作;

3) 与放坡开挖阶段相比,基坑开挖阶段造成建筑物远离基坑区域的沉降作用更为显著,沉降量增长为 22.9%~24.6%,应重点关注该区域在基坑开挖阶段产生的差异沉降现象;

4) 降水、放坡开挖、围护结构施工、基坑开挖、主体结构施工阶段五个施工阶段产生的最大差异沉降量分别为 3.29 mm、7.72 mm、0.72 mm、4.71 mm 与 1.09 mm,均满足现有规范中 10 mm 的相关要求,工程施工控制总体有效;

5) 本文通过对深基坑施工全流程进行跟进监测与数据分析,认为应做好放坡开挖与基坑开挖阶段的相应预警机制与处置措施,根据监测数据与演化趋势立即对周边建筑物沉降进行有效控制。

参考文献

- [1] 张治国,赵其华,鲁明浩.邻近深基坑开挖的历史保护建筑物沉降实测分析[J].土木工程学报,2015,48(S2): 137-142.
- [2] 李进军,王卫东,邸国恩,吴江斌.基坑工程对邻近建筑物附加变形影响的分析[J].岩土力学,2007,28(S1): 623-629.
- [3] 郭磊.新建基坑工程对既有地铁车站的影响及对策[J].铁道工程学报,2015,32(2): 109-112.
- [4] 贺俊,杨平,张婷.复杂条件下深基坑施工变形控制及周边环境监测分析[J].铁道建筑,2010(7): 96-99.
- [5] 朱才辉,李宁,刘明振,等.吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J].岩土工程学报,2013,35(2): 293-301.
- [6] 刘庚余.福州市某基坑开挖对周边环境的影响及监测分析[J].中国住宅设施,2020(11): 62-65.
- [7] 王卫东,吴江斌,翁其平.基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J].岩土力学,2004(S2): 251-255.
- [8] 葛苗苗,李宁,张炜,等.黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3): 745-753.
- [9] 钟扬,潘志文,欧阳波.机场综合交通枢纽基坑群监测分析研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(9): 100-103.
- [10] 吕林涛,梁伟,刘长宁.电子水准仪在矿区沉降监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2021,44(1): 170-172.
- [11] 李达,邓喀中,高晓雄,等.基于 SBAS-InSAR 的矿区地表沉降监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(10): 1531-1537.
- [12] 汪宝存,远顺立,王继华,等.InSAR 地面沉降监测精度分析与评价[J].遥感信息,2015,30(4): 8-13.
- [13] 张国亮.紧邻既有地铁车站深基坑工程稳定与变形特性研究[D]:[博士学位论文].长沙:中南大学,2012.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T50497-2019 建筑基坑工程监测技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [15] 夏梦然.深基坑基底注浆加固效果数值模拟分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1): 64-69.