

城市敏感环境下深基坑微扰动协同建造与变形主动控制技术研究

陆经纬

上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

城市中心区地下空间开发, 日益面临着对邻近运营中地铁、老旧建筑等极端敏感设施的严苛变形控制要求。结合上海普陀区真如镇街道社区卫生服务中心异地扩建项目, 采用基于“协同建造”理念的深基坑微扰动施工体系, 该体系以“全回转钻机微扰动清障”为施工前提, 以“分区差异化刚度支护”为刚度基础, 以“时空效应分区开挖”为控制策略, 以“BIM+ 信息化监测”为智能感知平台, 最终通过在敏感区域应用“支撑轴力伺服系统”实现变形的主动闭环控制。实证分析表明, 该“协同建造”体系将传统的被动防御转变为主动、智能、系统的全过程变形控制, 成功解决了城市更新中深基坑施工的重大技术难题, 为同类工程提供了可借鉴的实证与理论框架。

关键词

深基坑, 微扰动施工, 协同建造, 敏感环境, 地铁保护, 时空效应, 全回转清障, 轴力伺服系统

Research on Micro-Disturbance Construction and Collaborative Construction Technology for Deep Foundation Pit in Sensitive Urban Environments

Jingwei Lu

Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: April 11, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

The development of underground space in urban centers increasingly faces stringent deformation control requirements regarding adjacent operational subways, old buildings, and other highly sensitive facilities. Taking the relocation and expansion project of the Zhenru Town Street Community Health Service Center in Putuo District, Shanghai, as an example, a deep foundation pit micro-disturbance construction system based on the “collaborative construction” concept was adopted. This system uses “full-rotation drilling rig micro-disturbance obstacle removal” as a construction prerequisite, “zonal differentiated stiffness support” as a stiffness foundation, “spatiotemporal effect zonal excavation” as a control strategy, and “BIM + information monitoring” as an intelligent sensing platform. Ultimately, it achieves active closed-loop control of deformation by applying a “support axial force servo system” in sensitive areas. Empirical analysis shows that this “collaborative construction” system transforms traditional passive defense into proactive, intelligent, and systematic full-process deformation control, successfully solving a major technical challenge in deep foundation pit construction during urban renewal and providing a referable empirical and theoretical framework for similar projects.

Keywords

Deep Foundation Pit, Minimally Disturbed Construction, Collaborative Construction, Sensitive Environment, Subway Protection, Spatiotemporal Effects, Full-Rotation Obstacle Removal, Axial Force Servo System

Copyright © 2026 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

随着中国城市化进程进入存量更新阶段，城市中心区的土地资源日益稀缺，向地下拓展空间成为必然趋势。深基坑工程作为地下空间开发的先行环节，其施工环境日趋复杂，日益逼近既有的高密度建成环境，特别是运营中的地铁隧道、重要市政管线以及邻近的老旧建筑群。上海普陀区真如镇街道社区卫生服务中心异地扩建项目(下称“普陀项目”)即是此类工程的典型代表，其基坑开挖边线距离运营中的地铁 15 号线隧道最近仅 9.34 m，距离天然地基的居民楼最近仅 8.5 m。

传统的深基坑控制方法往往依赖于被动支护，通过增加围护桩长、增大支撑截面等方式提高支护体系刚度，这种“重支护、轻过程”的模式，对于施工全过程(如清障、降水、开挖)产生的扰动控制不足；同时，其无法应对软土蠕变[1]、温度效应等因素导致的支撑轴力损失，变形控制存在明显的滞后性，难以满足近距离敏感设施“微变形”[2]的控制要求。因此，现代深基坑工程正向“微扰动”和“智能化”两个维度发展。“微扰动”[3]理念强调从施工源头(如地下障碍物清除)到施工过程(如开挖卸荷)的全程扰动控制。“协同建造”[4]理念则强调利用信息化手段(如 BIM 技术、自动化监测)，将场地清障、围护支护、降水控制、土方开挖等原先孤立的技术环节，整合成一个具备“感知-分析-控制-反馈”能力的动态协同系统。近年来，国内外在深基坑微扰动施工、轴力伺服主动支护、BIM 与自动化监测等方向已形成大量成果：虞革新等[5]提出了地铁旁侧深大基坑的支护及变形控制理论，徐苏斌等[6]揭示了工业遗产棕地治理中的施工扰动控制原则，王雪燕[7]的研究提出了在滨海地区进行淤泥质成桩的控制方法，液

压伺服支撑系统实现了支撑轴力动态补偿[8], BIM 与实时监测集成逐步应用于基坑安全管控[9][10]。但现有研究大多以单一技术应用为主, 缺乏对清障 - 支护 - 开挖 - 监测 - 伺服的全过程系统集成, 尤其在近距离 10 m 地铁、天然地基老旧建筑与复杂棕地耦合的极端敏感条件下, 缺少完整的协同建造体系与闭环控制实践, 这也是当前工程与理论研究的主要空白。传统的深基坑控制方法往往依赖于被动支护, 通过增加围护桩长、增大支撑截面等方式提高支护体系刚度, 这种“重支护、轻过程”的模式, 对于施工全过程(如清障、降水、开挖)产生的扰动控制不足; 同时, 其无法应对软土蠕变[11]、温度效应等因素导致的支撑轴力损失, 变形控制存在明显的滞后性, 难以满足近距离敏感设施“微变形”[12]的控制要求。

因此, 现代深基坑工程正向“微扰动”和“智能化”两个维度发展。“微扰动”[13]理念强调从施工源头(如地下障碍物清除)到施工过程(如开挖卸荷)的全程扰动控制。“协同建造”[14]理念则强调利用信息化手段(如 BIM 技术、自动化监测), 将场地清障、围护支护、降水控制、土方开挖等原先孤立的技术环节, 整合成一个具备“感知 - 分析 - 控制 - 反馈”能力的动态协同系统。

本文以普陀项目为例, 研究以“全回转清障 + 分区支护 + 时空效应开挖 + 轴力伺服 + BIM + 自动化监测”形成闭环控制基坑变形的技术方法, 通过现场实测试验效果。本文成果可为近地铁、近老旧建筑深基坑工程提供系统技术方案。

2. 工程概况

普陀项目位于上海市普陀区真如镇街道, 拟建设一栋地上 6 层、地下 2 层的综合楼。基坑开挖总面积约 4000 m^2 , 周长约 250 m , 普遍开挖深度约 9.64 m 。场地工程地质条件属于典型的上海软土地区, 浅层地下水位埋深仅 $1.2\sim 1.3\text{ m}$ 。本基坑安全等级为二级, 但基坑环境等级高达 1~2 级, 主要风险来源于对周边敏感环境的影响。基坑与周边环境位置关系如图 1 所示:

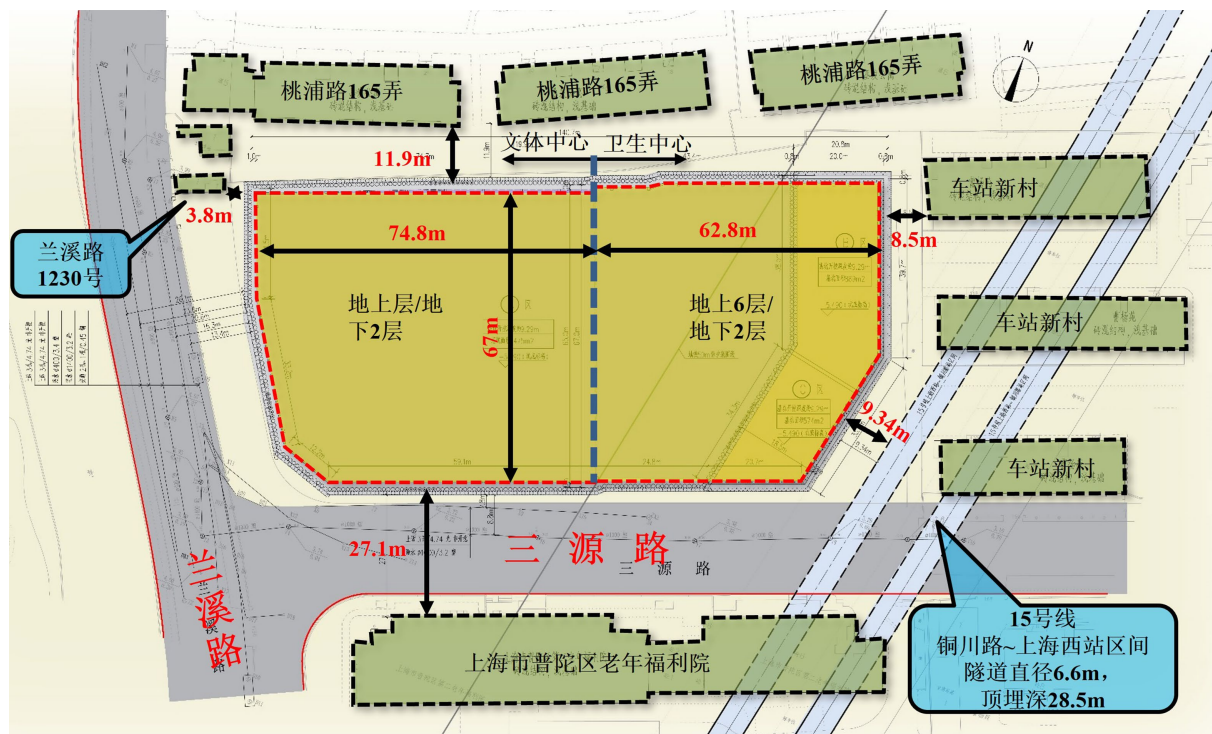


Figure 1. Schematic diagram of foundation pit plan
图 1. 基坑平面图示意图

3. 极端敏感环境制约分析

3.1. 空间极端邻近性

普陀项目基坑面临的首要挑战是其与周边敏感设施在空间上的极端邻近性。

(1) 邻近运营中地铁：基坑东南侧紧邻运营中的地铁 15 号线区间隧道，基坑边线距离隧道盾构外轮廓线(保护区边界)最近距离仅为 9.34 m。

(2) 紧邻老旧居民楼：基坑东侧紧邻曹杨苑小区，北侧为嘉发公寓小区。这两处均为已建多层住宅，且关键在于其采用的是“天然地基”。基坑边线距离曹杨苑小区最近距离仅为 8.5 m。

这种空间邻近性带来了双重且相互制约的控制目标。首先，9.34 m 的极限距离要求基坑围护体系必须具有极高的刚度，以抵抗土压力和施工荷载，将基坑的水平位移控制在严苛的阈值(通常为毫米级)内，确保地铁隧道的运营安全。其次，8.5 m 外的“天然地基”居民楼，意味着其基础较浅，对地基土的沉降极其敏感。基坑的降水和开挖卸荷引起的周边土体竖向变形，是威胁该类建筑安全的主要因素[15]。因此，工程必须在“控制水平位移”和“控制竖向沉降”两个维度上同时达到最高标准。

3.2. 复杂“棕地”地下条件

项目场地原为上海房屋设备有限公司的老厂区。作为典型的“棕地”[16]地块，其地下条件极其复杂。根据物探报告和施工组织设计，地下障碍物遍布全场，主要包括：

- (1) 旧建筑基础：包含大量条形砖砌基础、独立基础、混凝土条形基础。
- (2) 旧工业设施：如工业承台、航吊基础、工业油池、工业管涵等。
- (3) 旧桩基：存在大量历史遗留的预制方桩和灌注桩。

这些障碍物，特别是旧桩基和工业承台，与拟建工程的围护结构(地连墙、围护桩)和工程桩在平面上严重冲突。这一制约带来了一个尖锐的“施工悖论”：一方面，必须设置高刚度的地连墙(B、C区)来保护 9.34 m 外的地铁；另一方面，在地连墙施工之前，必须对这些坚硬的地下障碍物进行清除。若采用传统的镐头机破碎或明挖等清障方法，其产生的剧烈振动和强力挤土扰动，将不可避免地通过土体传播，对近在咫尺的地铁隧道造成不可逆的破坏。

3.3. 群坑施工与时空效应

为应对复杂的场地和保护要求，本工程基坑被划分为 A、B、C 三个区。其中，A 区(远离地铁侧)采用钻孔灌注桩支护[17]；B、C 区(紧邻地铁侧)采用地连墙支护[18]。

这种分区不仅是施工部署的需要，更是一种主动利用岩土工程“时空效应”的控制策略。采用“分层、分块、限时、对称开挖”的原则，并且在总体顺序上(根据的逻辑)采用“先远(A区)后近(B、C区)”的施工部署。通过时间和空间上的精细化管理，将一次性大面积开挖的卸荷扰动分解为若干可控的子单元，通过控制开挖速率和利用已施工结构(A区)的有利影响，实现对 B、C 区敏感侧变形的精细化控制。

Table 1. Main environmental constraints of the foundation pit in the Putuo project

表 1. 普陀项目基坑主要环境制约因素

保护对象	最小距离(m)	结构形式	敏感性分析
地铁 15 号线	9.34	盾构隧道	对水平位移、不均匀沉降极其敏感
曹杨苑小区	8.5	天然地基多层住宅	对降水沉降、开挖卸荷沉降高度敏感
嘉发公寓	15	天然地基多层住宅	敏感，次于曹杨苑
地下障碍物	遍布全场	旧桩基、承台、油池	清障扰动(振动、挤土)构成主要风险源

综上所述, 普陀项目是一个集“极限邻近地铁”“紧贴天然地基民宅”“复杂棕地清障”和“群坑时空效应”四大挑战于一体的复杂工程[19]。如表 1 所示。

4. 微扰动施工关键技术体系

4.1. 前提保障：全回转钻机(ARD)微扰动清障

为破解上述三大核心制约, 普陀项目采用了一套相互关联、逐级递进的微扰动施工技术体系, 从源头清障、刚度设防到过程控制, 实现了全链条的扰动抑制。

针对 3.3 节中提出的“施工悖论”, 即清障作业本身对地铁的威胁, 普陀项目在地铁保护区(B、C 区)内, 摒弃了传统的明挖和镐头机破碎方案, 创新性地采用了“AR-260H 全回转钻机”进行“全回转全套管钻进工艺”清障。

全回转钻机实现“微扰动”的机理在于其“全套管”作业模式:

(1) 隔离振动与扰动: 施工时, 钢制套管在液压驱动下旋转切削压入土体, 直至穿透障碍物。套管在土中形成了一个刚性的临时屏障。随后, 钻机在套管内部通过锤抓或冲击钻等方式将混凝土、旧桩基等障碍物抓取或破碎后取出。所有清障作业的振动和冲击能量均被限制在套管内部, 无法向 9.34 m 外的地铁隧道传播, 实现了振动隔离。

(2) 防止坍塌与挤土: 在整个清障和取障过程中, 套管全程对孔壁提供支撑, 有效防止了孔壁坍塌和周边土体向孔内(开挖面)的移动。这避免了传统清障方式因土体损失而引起的周边地层沉降和对邻近土体的挤压扰动[20]。

在普陀项目中, 微扰动清障不仅是保护地铁的“使能技术”, 更是后续地连墙(B、C 区支护主体)施工的质量前提。只有通过 ARD 技术, 才能在复杂障碍物区域形成一个“干净”、稳定、垂直的槽段空间, 为后续地连墙的顺利成槽、钢筋笼下放、混凝土浇筑以及关键的“锁扣管接头”的精确安装提供保障, 确保 B/C 区围护墙体自身的连续性、刚度和止水效果。

4.2. 刚度控制：分区差异化支护体系

针对 A 区(远离)和 B/C 区(近接)截然不同的环境保护要求, 项目采用了“分区施策”的差异化支护体系, 实现了安全与经济的平衡。

A 区(远离地铁侧): 采用“钻孔灌注桩 + 三轴搅拌桩止水帷幕 + 二道砼支撑”的常规组合。该体系刚度适中, 主要通过三轴桩帷幕解决止水问题, 以经济的方式满足了对 15 m 外嘉发公寓(天然地基)的一般保护要求。

B/C 区(紧邻地铁侧): 采用“ $\Phi 800$ 地厚地下连续墙 + 三轴槽壁加固 + 一道砼支撑 + 两道 $\Phi 800$ 钢管撑”的高标准组合。

这种差异化设计的协同机理体现在(如表 2 所示):

Table 2. Comparison of support systems between area A and areas B/C

表 2. A 区与 B/C 区支护体系对比

区域	邻近对象	围护结构	止水帷幕	支撑体系	设计意图
A 区	居民楼(15 m)	$\Phi 800$ 钻孔灌注桩	三轴搅拌桩	2 道砼支撑	经济、常规刚度、常规止水
B/C 区	地铁(9.34 m)/居民楼(8.5 m)	800 mm 地连墙	地连墙本体(锁扣管接头)	1 道砼 + 2 道 $\Phi 800$ 钢管支撑	高刚度、高止水性、主动控制

(1) 刚度协同: B/C 区采用的 $\Phi 800$ 地连墙, 其整体连续性和抗弯刚度远大于 A 区的“桩 + 帷幕”体系。这是抵抗地铁侧(9.34 m)巨大土压力、严格控制水平位移的必然选择。

(2) 止水协同: 地连墙本身即是高等级的止水结构, 辅以“锁扣管接头”确保墙幅间的连接质量。相比 A 区的组合式帷幕, 地连墙能更有效地阻断基坑降水引起的水力联系, 最大限度地减少对 8.5 m 外曹杨苑小区“天然地基”的沉降影响。

(3) 控制协同: B/C 区在第二、三道支撑采用了钢管撑。这一选择的深层意义在于, 钢支撑是实现“主动控制”的物理基础。与无法调节的混凝土支撑不同, 钢支撑(特别是其端部)易于安装液压伺服装置, 为后续引入“轴力自动补偿系统”预留了接口。

5. 智能协同建造闭环控制

智能协同建造形成闭环, 关键在于协同, 协同的核心要点是“清障保前提→支护保刚度→开挖控扰动→伺服主动闭环→BIM+ 监测综合信息”, 只有把握好智能协同的每一要点, 才能发挥其整体优势。

5.1. 协同策略: 基于“时空效应”的开挖部署

基坑开挖是最大的卸荷扰动源。普陀项目通过精细化的开挖部署, 主动利用了土体的“时空效应”, 化解了集中开挖的风险。

(1) 空间协同(化整为零): 施工方案采用“先远(A 区)后近(B、C 区)”的总体顺序。这一策略的力学机理在于, 当 A 区基坑率先开挖并完成地下结构(底板、中板)的回筑后, A 区形成的巨型地下结构相当于在 B/C 区的侧后方打入了一个巨大的“被动压舱物”和“深层锚固体”。它极大地提高了 B/C 区开挖时坑外土体的整体稳定性, 分担了 B/C 区开挖对地铁侧的变形传递, 起到了“遮拦效应”, 显著减小了 B/C 区开挖对地铁的整体扰动。

(2) 时间协同(限时控制): 施工方案严格强调“分层、分块、限时、对称开挖”及“随挖随撑”。这是“时空效应”理论的核心应用。在上海软土地层中, 土体变形不仅与卸荷量有关, 更与时间(蠕变)密切相关。“限时开挖”通过快速完成开挖-支撑的工序转换, 极大地缩短了开挖面在无支撑状态下的暴露时间, 有效抑制了软土的蠕变变形, 防止了变形的滞后发展。

5.2. 协同核心: 从被动受力到“主动补偿”

普陀项目在最敏感的 B、C 区(临近地铁侧), 采用了“混凝土支撑伺服系统”[21], 即“钢支撑轴力自动补偿系统”。这是协同建造体系从“被动防御”转向“主动控制”的核心技术。

传统的钢支撑是被动受力构件, 其面临的重大问题是“轴力损失”。在软土地层中, 基坑外的土体蠕变、支撑自身的温度效应(如日照升温、夜间降温)以及支撑(围檩)与围护墙之间的混凝土收缩, 都会导致预加的支撑轴力发生“松弛”和损失。轴力一旦损失, 地连墙就会向坑内发生微小变形, 进而带动 9.34 m 外的地铁隧道产生变形。

轴力伺服系统(或称自动补偿系统)彻底改变了这一模式。其工作原理如下:

- (1) 主动施力: 该系统在钢支撑端部安装高精度压力传感器和液压伺服作动器(高压油泵)。
- (2) 实时监测: 传感器实时监测钢支撑的实际轴力。
- (3) 主动补偿: 控制系统预先设定一个轴力控制阈值(例如设计轴力的 80%)。一旦监测到轴力因上述原因(蠕变、温度)“松弛”并低于该阈值, 伺服系统会自动启动, 液压系统向支撑施加压力, 主动将其轴力“顶”回至设计水平。

通过该系统, B/C 区的钢支撑从“被动受力构件”转变为“主动施力构件”, 确保了在土方开挖后漫

长的地下室施工周期中，围护墙始终承受着恒定、足额的预应力，从而将地连墙的变形“主动锁定”在初始状态，实现了对应力的主动管理。

5.3. 协同基础：从人工巡检到“智能感知”

普陀项目采用了“自动化监测系统”[22]和“信息化施工”[23]。监测内容不仅包括常规的建筑物沉降、地表沉降，更重点监测“地墙深层水平位移”、“土体深层水平位移”[24]、“支撑轴力”以及“地铁15号线隧道”本体的变形。

“智能感知”与“主动控制”在此形成了完美的协同闭环：

(1) 数据输入：自动化监测系统(特别是轴力计和测斜仪)构成了“感知神经”。它为伺服系统提供了实时、高频的决策依据——即实际的轴力值和实际的墙体位移。

(2) 闭环形成：传统的监测仅用于报警，而在协同建造体系中，监测数据是控制环路的一部分：① 自动化监测感知到轴力下降或墙体位移速率加快；② 伺服系统控制器分析数据，判断偏离阈值；③ 伺服系统主动加压补偿；④ 监测系统再次反馈墙体位移速率和轴力已恢复稳定。这一闭环确保了变形在萌芽阶段即被“主动”消除。

5.4. 协同平台：BIM 技术的数字化集成

普陀项目在设计施工阶段采用 BIM [25]，BIM 技术在此协同体系中扮演了“数字孪生”[26]和“信息平台”的角色。

(1) 清障协同(碰撞检查)：在施工前，利用 BIM 技术建立地下障碍物(旧桩基、承台)的三维模型，并将其与新设计的地连墙和工程桩模型进行“碰撞检查”。这使得全回转钻机的清障范围和深度得以精确化，避免了“盲清”的低效和“漏清”的风险。

(2) 时空协同(4D 模拟)：利用 BIM 的 4D 施工模拟功能，可以对“先远后近”、“分层分块”的开挖策略进行可视化推演。通过模拟不同工况下的土方卸荷过程，可以预分析其对基坑变形和地铁隧道的动态影响，从而在施工前优化“时空效应”的利用方案。

(3) 信息协同(数据集成)：BIM 模型作为项目的中心数据库，集成了设计参数(如地连墙标高、支撑位置)、施工进度(4D)、监测数据(如自动化监测点位)和伺服系统状态。这为项目管理提供了一个统一的“数字协同”平台，打破了设计、施工、监测之间的信息孤岛，实现了高效的协同管理。

6. 实施效果与监测数据分析

6.1. 邻近地下管线监测

基坑施工期间邻近地下市政管线变形总体正常，各监测点最终沉降量均在 -8.00 mm 以内，均未超出报警值(累计沉降量报警值 $\geq 10\text{ mm}$)，整个施工期内也未出现日沉降量超出报警值的情况(累计沉降量报警值 $\geq 3\text{ mm}$)。从变形发展趋势看，各管线在前期的工程桩施工至第一道支撑施工期间沉降量不太明显，自第二层土方开挖起沉降开始出现小幅度变化，至监测工作结束前期变形逐渐收敛，并趋于相对稳定。各管线变化趋势如下图 2、图 3 所示。

6.2. 邻近建筑物监测

基坑施工期间邻近建筑物沉降正常，各监测点的最终累计沉降量均在 -0.45 mm 以内，属控制范围内(建筑物累计沉降量报警值 $\geq 20\text{ mm}$)。各建筑物的倾斜也无明显变化。各建筑物沉降变化趋势如下图 4、图 5 所示。

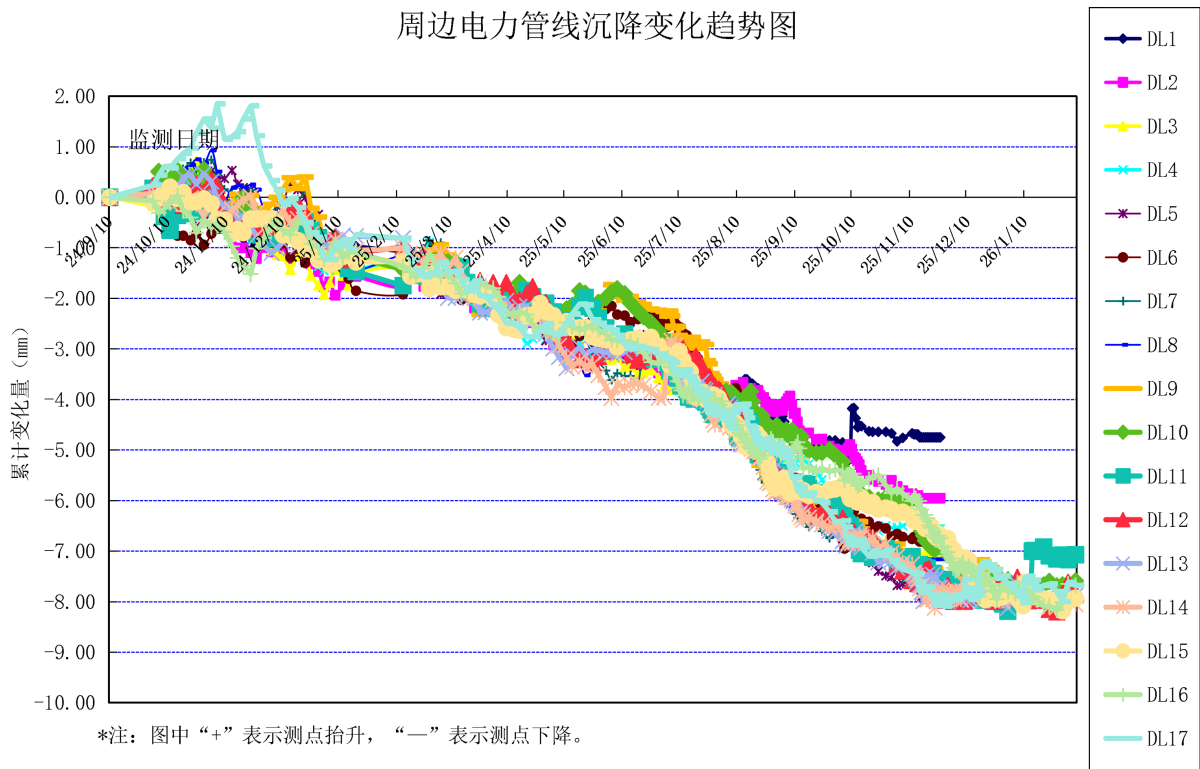


Figure 2. Trend chart of settlement changes of surrounding power pipelines

图 2. 周边电力管线沉降变化趋势图

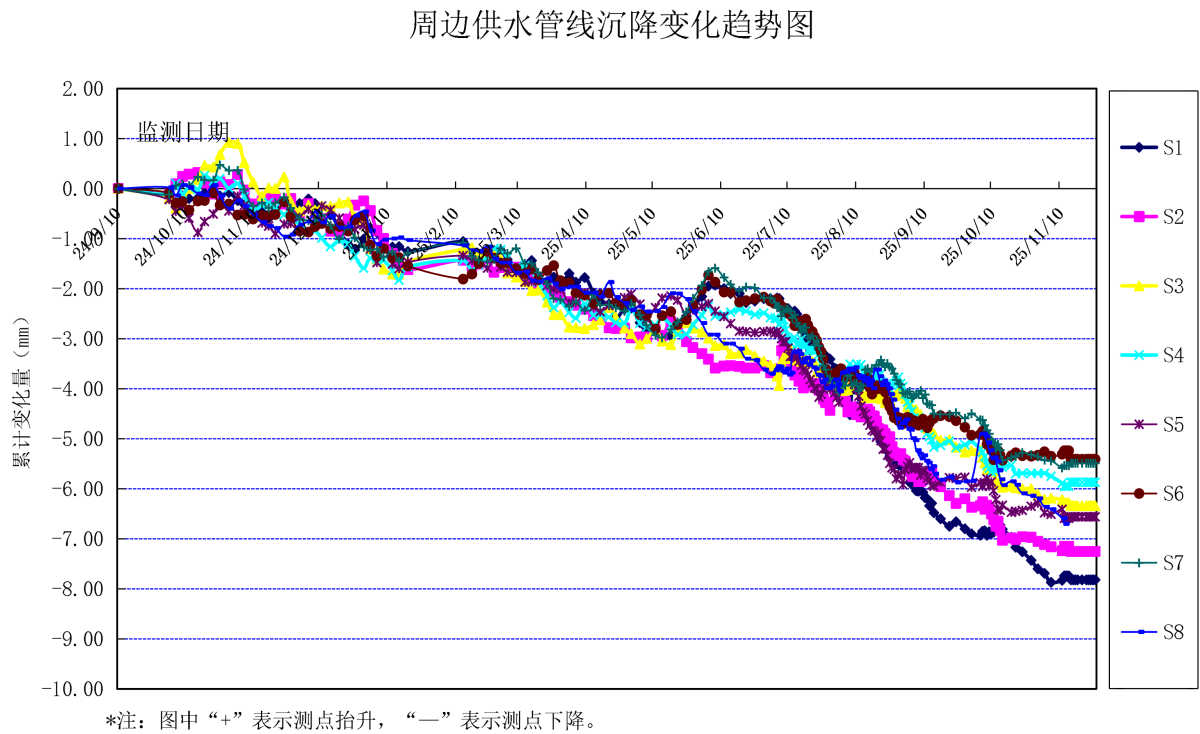


Figure 3. Trend chart of settlement changes in surrounding water supply pipelines

图 3. 周边供水管线沉降变化趋势图

周边建筑物沉降变化趋势图1

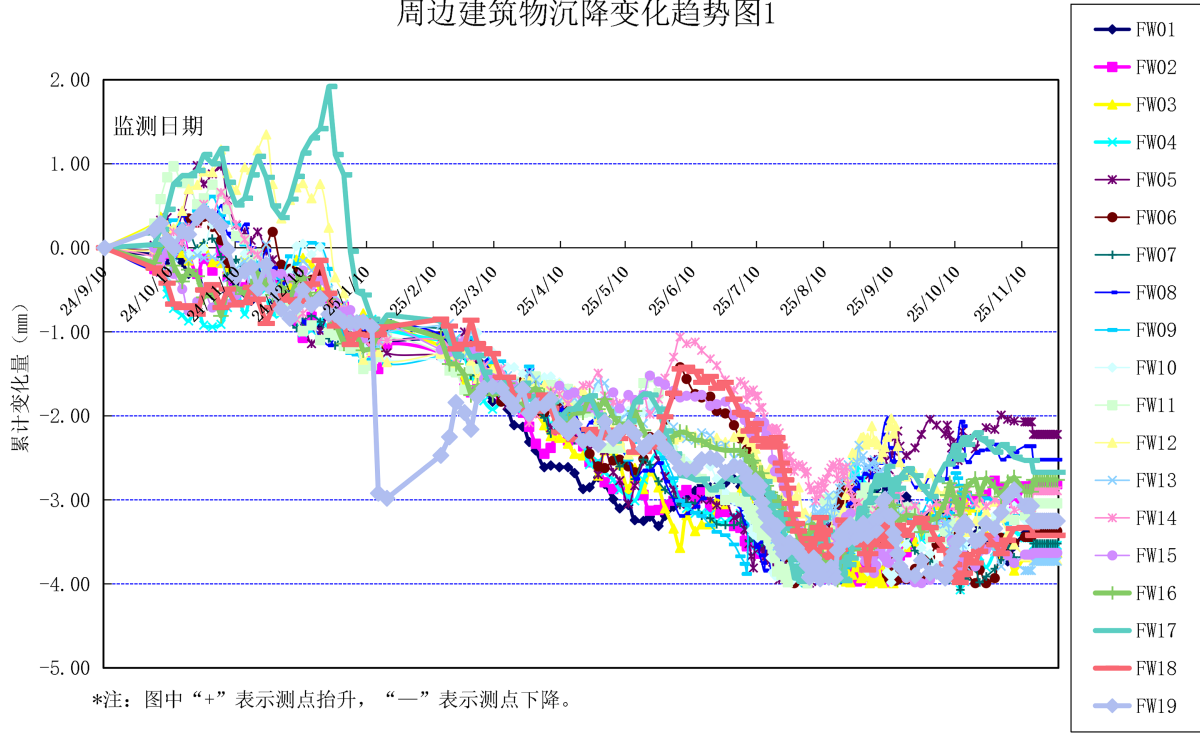


Figure 4. Trend chart 1 of roadside building settlement changes

图 4. 路边建筑物沉降变化趋势图 1

周边建筑物沉降变化趋势图2

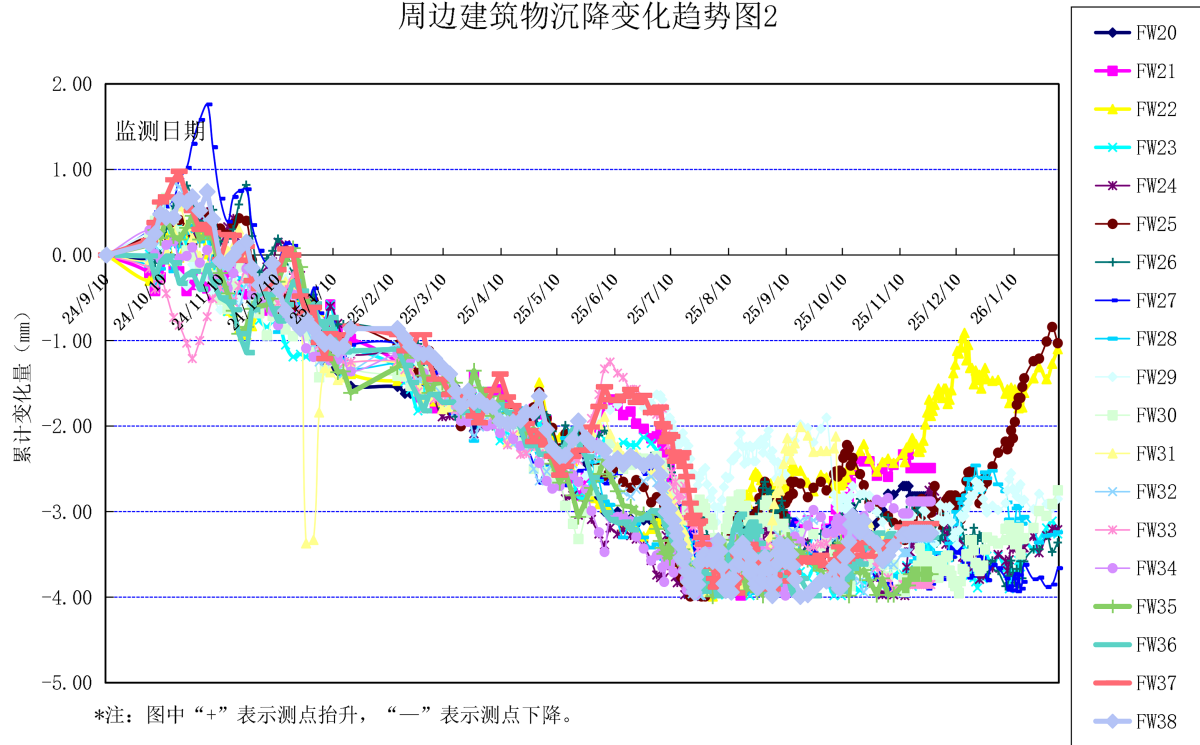


Figure 5. Trend chart 2 of settlement changes of buildings along the roadside

图 5. 路边建筑物沉降变化趋势图 2

6.3. 基坑围护墙体顶部监测

基坑施工期间围护顶部沉降量总体正常，在整个基坑施工期间沉降表现为抬升。基坑围护墙顶的水平位移相对较小，其第一次的变形为基坑开挖至基础底板浇筑完成期间，第二次的位移发展期为第一道支撑拆除期间，在此期间基坑围护墙顶的水平位移量稍明显。截止基坑回填完成，围护墙顶的沉降及水平位移的累计变化量均在控制范围内，累计变化量未超过报警值(累计沉降、水平位移量 ≥ 20 mm)。基坑围护墙体顶部变化趋势如下图 6、图 7 所示。

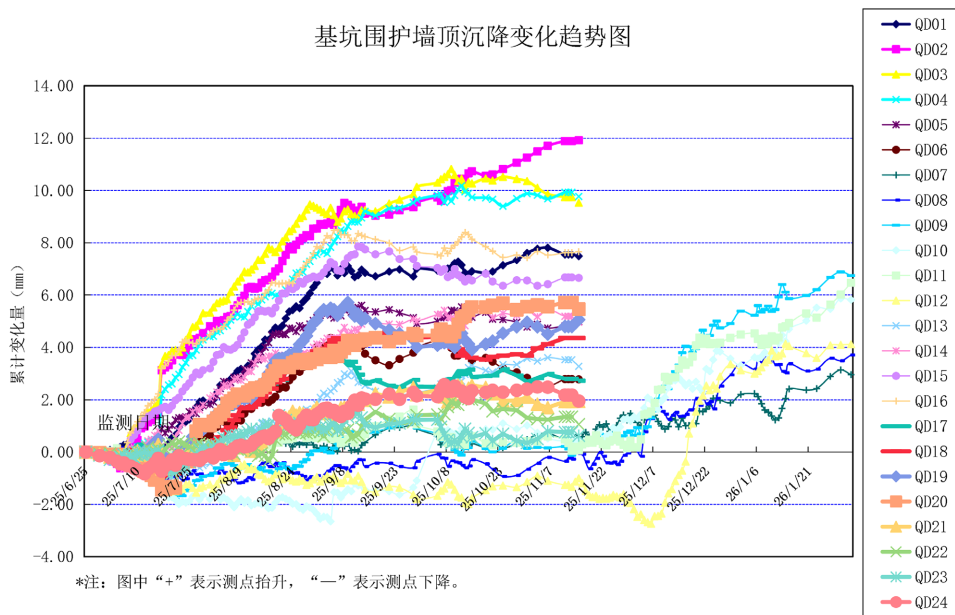


Figure 6. Trend chart of settlement variation at the top of foundation pit retaining wall
图 6. 基坑围护墙顶沉降变化趋势图

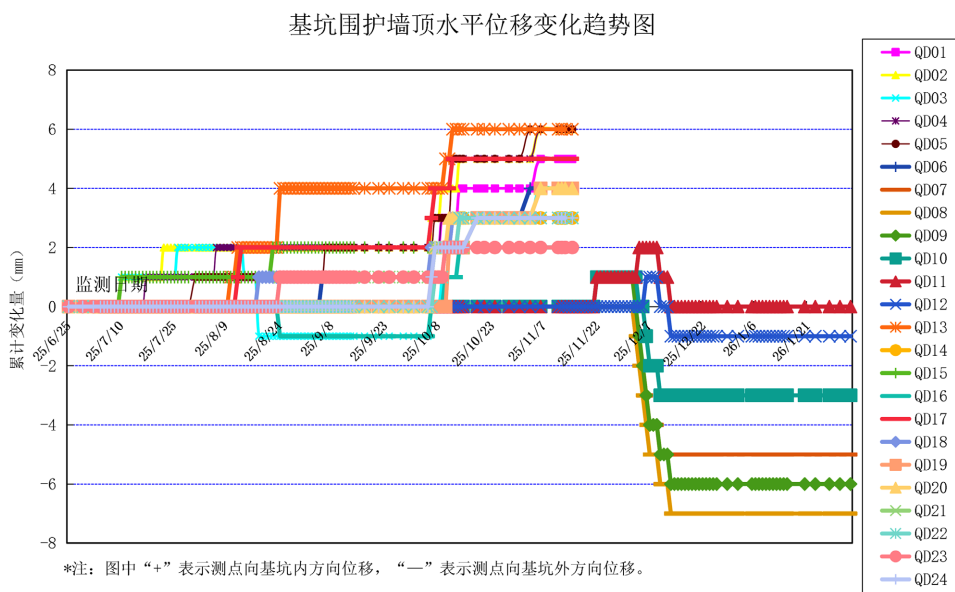


Figure 7. Trend chart of horizontal displacement variation at the top of the foundation pit retaining wall
图 7. 基坑围护墙顶水平位移变化趋势图

6.4. 基坑围护支撑轴力监测

在基坑施工期间支撑轴力变化均正常，至支撑拆除时，第一道支撑应力监测点累计应力均在 4500 KN 以内，未超过报警值；第二道支撑支撑应力监测点累计应力均在 5300 KN 以内。均在控制范围内(第一道支撑累计应力 ≥ 8100 KN、第二道支撑累计应力 ≥ 6400 KN、第三道支撑累计应力 ≥ 2000 KN)。在基坑开挖至基础底板浇筑期间个别测点应力相对偏大，至基础底板浇筑完成，各支撑应力监测点数据显示支撑轴力逐渐趋于稳定状态，整基坑施工过程中支撑未出现明显裂缝、扭曲等险情。各测点应力变化见下图 8、图 9：

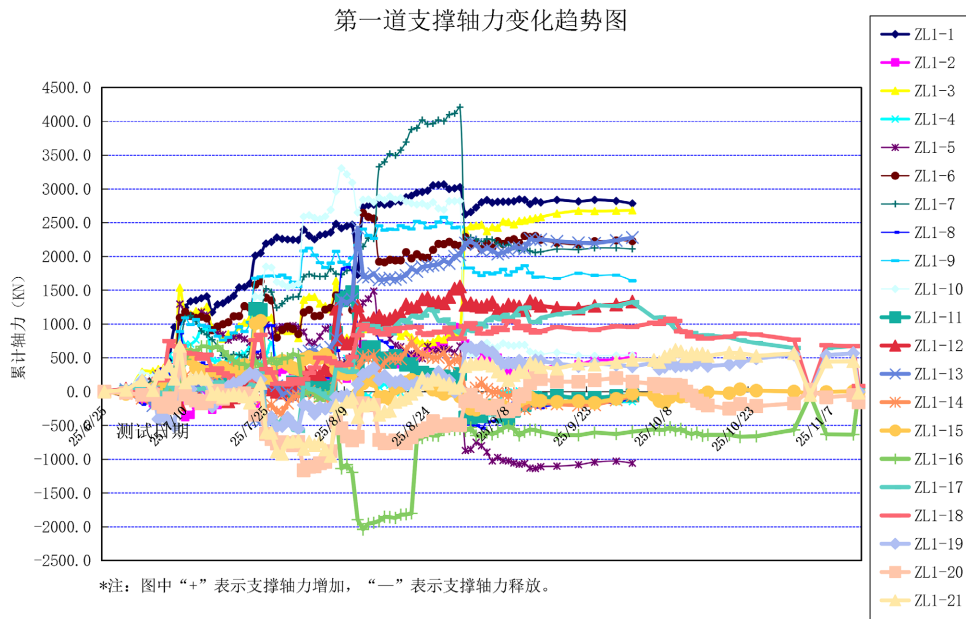


Figure 8. Trend chart of the first support axial force variation
图 8. 第一道支撑轴力变化趋势图

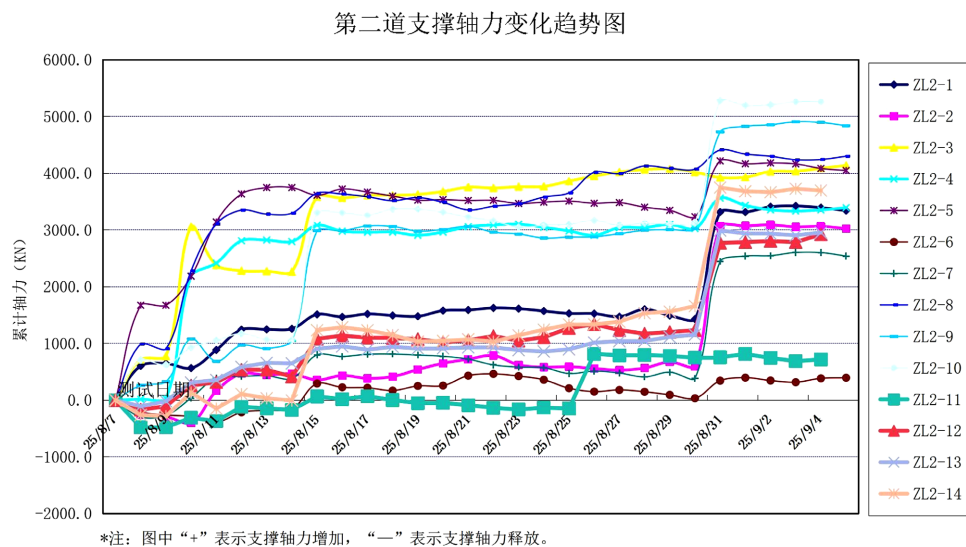


Figure 9. Trend diagram of the second support axial force change
图 9. 第二道支撑轴力变化趋势图

7. 结语

在城市更新日益深入的背景下，深基坑工程正面临着前所未有的挑战。上海普陀真如社区卫生中心项目作为典型案例，其工程实践验证了，面对 9.34 m 近接运营地铁、8.5 m 紧邻天然地基民宅以及复杂“棕地”地下障碍物的极端制约，单一的被动支护技术已难以为继。

本文通过解构该项目的技术体系，提炼出一种“微扰动协同建造”的系统化解决方案。该体系是一个四位一体、逐级递进的闭环系统：

(1) 前提(微扰动清障)：以全回转钻机(ARD)解决了“棕地”施工的源头扰动和“施工悖论”，是后续一切保护措施得以实现的前提。

(2) 基础(分区差异化支护)：以“A区桩 + B/C区地连墙”的差异化设计，实现了对敏感区的高刚度、高止水性被动保护，兼顾了安全与经济。

(3) 策略(时空效应开挖)：以“先远后近”和“分层限时”的时空部署，优化了卸荷过程，利用既有结构实现了协同受力。

(4) 核心(主动智能闭环)：以“信息化监测 + BIM”为“感知神经”，以“轴力伺服系统”为“控制中枢”，实现了从被动防御到主动控制的跃升，将变形消解于萌芽状态。

普陀项目的成功实践表明，未来城市深基坑工程的控制正从传统的“结构工程”转变为高度依赖信息化的“系统工程”。这种集成化、主动式、智能化的“协同建造”模式，是应对未来高密度城市复杂环境挑战的必然发展方向。

参考文献

- [1] 胡子萱. 软土基坑中蠕变效应研究[J]. 四川建材, 2025, 51(9): 91-93.
- [2] 王同华. 软弱地层地铁深基坑施工邻近建筑物微变形控制技术[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(1): 129-135.
- [3] 彭伟炯, 蒋贝毅. 复杂地质环境下灌注桩施工中的微扰动清障技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(12): 2094-2096, 2100.
- [4] 龚剑, 房霆宸. 数字化施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 虞革新, 金琳. 地铁旁侧深大基坑的支护及变形控制技术[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 221-226.
- [6] 徐苏斌, 王宁远, 赵子杰. 城市工业遗产棕地治理国内外研究小议[J]. 当代建筑, 2025(2): 50-56.
- [7] 王雪燕. 滨海地区淤泥质地层软土钻孔灌注桩质量控制研究[J]. 中国新技术新产品, 2023(20): 99-101.
- [8] 蔡子勇, 刘屹硕, 乔世范. 深厚软土狭长基坑地连墙变形特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15561-15571.
- [9] 王壮壮. 论复杂环境下深基坑变形控制问题[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(二). 北京: 北京建工环境修复股份有限公司, 2025: 1185-1189.
- [10] 翟杰群, 贾坚, 谢小林. 混凝土支撑伺服系统在某深基坑工程的应用研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(12): 147-152.
- [11] 李福星, 郑玉平, 高升. 深基坑自动化监测系统优化研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 71-75.
- [12] 王建党, 袁长发, 刘彬锋. 自动监测及信息化施工技术在基坑工程施工中的应用[J]. 建筑技术, 2024, 55(2): 140-142.
- [13] 元男男, 柴栋. 软土地深基坑开挖过程深层水平位移测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(7): 103-109.
- [14] 李雨希. 基于 BIM 技术下的基坑开挖可视化及数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌工程学院, 2025.
- [15] 汪从军, 李建国. 基于数字孪生技术的施工现场深基坑智能监测预警系统[P]. 中国专利: CN202110783596.7. 2020-10-02.
- [16] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 上海软土地区深基坑微扰动施工关键技术[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 1-6.
- [17] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程时空效应理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- [18] Li, F., Zheng, M., Yu, J., *et al.* (2025) Deep Learning-Based Safety Early-Warning Model for Deep Foundation Pit

-
- Construction with Extra-Long Weir Construction Method—A Case Study of the Jinji Lake Tunnel. *Buildings*, **15**, Article 4270. <https://doi.org/10.3390/buildings15234270>
- [19] Park, K. (2005) Analytical Solution for Tunnelling-Induced Ground Movement in Clays. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**, 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.009>
- [20] Dehghan, A.N. (2020) Influence of Forepoling Umbrella on the Settlements Induced by Shallow Urban Tunneling. *Geotechnical and Geological Engineering*, **38**, 5005-5022. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01345-y>
- [21] Jin, D., *et al.* (2022) Modeling Hydraulic Fracturing and Blow-Out Failure of Tunnel Face During Shield Tunneling in Soft Soils. *International Journal of Geomechanics*, **22**, Article ID: 06021041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002279)
- [22] Zhang, F.H., *et al.* (2020) Shape Memory Polyurethane Microcapsules with Active Deformation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 47059-47064. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c14882>
- [23] Qiao, Y.Q., Huang, M.S. and Shi, Z.H. (2025) Simplified Mechanism for Evaluating the Basal Stability of Narrow-Deep Excavation in Nonhomogeneous Clay. *International Journal of Geomechanics*, **25**. <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-10126>
- [24] Shim, H.J., Ham, H.N. and Kim, J.J. (2024) Collaborative BIM-Based Construction Coordination Progress Modeling Using Extended Collaborative Process Modeling (exCPM). *Buildings*, **14**, Article 358. <https://doi.org/10.3390/buildings14020358>
- [25] Liu, D.H., Sun, C.Y., Chen, J.J. and Liu, L. (2023) Multisensory and BIM-Integrated Digital Twin to Improve Urban Excavation Safety. *Journal of Computing in Civil Engineering*, **37**. <https://doi.org/10.1061/JCCEE5.CPENG-5354>
- [26] Aladayleh, K.J. and Aladaileh, M.J. (2024) Applying Analytical Hierarchy Process (AHP) to BIM-Based Risk Management for Optimal Performance in Construction Projects. *Buildings*, **14**, Article 3632. <https://doi.org/10.3390/buildings14113632>