

地铁深基坑近接高铁降水耦合影响与协同控制

王晓睿^{1, 4}, 李汶蔚², 张坤³, 张华青^{1, 4}

1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450046
2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024
3. 上海隧道工程有限公司, 上海 200232
4. 城市地下交通工程减灾防灾河南省交通运输行业技术创新中心, 河南郑州 450046

摘要: 针对地铁深基坑降水对邻近高铁桥梁桩基变形与安全运营的影响, 开展渗流-应力耦合作用下的桩-土相互作用机理研究, 并提出有效的协同控制措施。通过现场预降水试验, 监测不同降深条件下桥桩周边地下水位、地表沉降变化; 运用 Abaqus 进行数值模拟, 建立渗流-应力耦合模型, 分析不同降水深度对桩基侧摩阻力、中性点位置的影响, 并与现场实验数据对比总结变化规律。随着降水深度增加, 渗流场扰动区逐渐扩展至桩基, 并在桩基附近形成绕桩渗流的模式; 桩基变形呈非线性增长, 降深超过 10m 后沉降变形与横向变形显著加大; 桩身上部负摩阻力增大, 中性点下移, 桩底正摩阻力增强。地铁深基坑近接高铁降水时桥桩变形受降水深度影响较大, 可采用多级降水、止水帷幕、实时水位监测与回灌等协同控制措施, 控制桥桩变形, 保障高铁运营安全。本研究为类似近接工程提供了理论依据与技术支持。

关键词: 地铁深基坑; 基坑降水; 高铁桥梁变形; 数值模拟

中图分类号: TU753

收稿日期: 2025-07-28

Research on Coupling Effects and Collaborative Control of Dewatering in Metro Deep Foundation Pits Adjacent to High-Speed Railways

WANG Xiao-rui^{1, 4}, LI Wen-wei², ZHANG Kun³, ZHANG Hua-qing^{1, 4}

1. School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and

基金项目: 河南省重点研发专项项目 (251111240800); 河南省重点研发项目 (241111321300);

第一作者: 王晓睿 (1975—) 男, 教授, 博士, 从事岩土工程、城市地下工程技术方面的研究; E-mail: wangxiaorui@ncwu.edu.cn

通信作者: 李汶蔚 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事城市地下工程方面的研究; E-mail: liwenwei0114@163.com

Electric Power, Zhengzhou 450046, China

2. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China;

3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200232, China;

4. Disaster Prevention and Mitigation for Urban Underground Transportation Engineering Henan Provincial Transportation Industry Technology Innovation Center, Henan Zhengzhou 450046, China

Abstract: Aiming at the impact of dewatering in metro deep foundation pits on the deformation and safe operation of adjacent high-speed railway bridge piles, this study investigates the mechanism of pile-soil interaction under seepage-stress coupling effects and proposes effective collaborative control measures. Through field pre-dewatering tests, variations in groundwater levels and surface settlement around bridge piles under different drawdown conditions were monitored. Using Abaqus for numerical simulation, a seepage-stress coupling model was established to analyze the influence of different dewatering depths on the lateral friction resistance and neutral point position of pile foundations, with comparative analysis against field data to summarize variation patterns. As the dewatering depth increases, the disturbed seepage field gradually extends toward the pile foundation, forming a seepage flow pattern around the piles. The deformation of the pile foundation exhibits nonlinear growth, with significant increases in settlement and lateral deformation observed after exceeding a 10m drawdown. Negative skin friction in the upper part of the pile increases, the neutral point shifts downward, and positive skin friction at the pile base enhances. The deformation of bridge piles adjacent to metro deep foundation pits during dewatering is considerably influenced by the dewatering depth. Collaborative control measures such as multi-stage dewatering, waterproof curtains, real-time water level monitoring, and recharge can be adopted to mitigate pile deformation and ensure the operational safety of high-speed railways. This research provides theoretical support and technical guidance for similar adjacent engineering projects.

Keywords: Metro Deep Foundation Pit; Foundation Pit Dewatering; High-Speed Railway Bridge Deformation; Numerical Simulation

1. 引言

在城市化进程高速推进的当下，中国城市交通线网正经历着深刻且影响深远的变革，其中高铁线路与地铁线路的交互发展成为备受瞩目的焦点。高铁凭借其高速、长距离运输，成为跨城市传输的高效桥梁。而地铁则凭借快速便捷的特性，在城市密集布局，提升了城市内部通勤效率。随着交通基础设施的快速发展，高速铁路线路与地铁线路近距离并行或交叉的工程案例日益增多，由此引发的工程安全隐患日趋显著（仕鹏张,2025;何洪文等,2023）。当地铁深基坑施工邻近高铁桥梁桩基时，基坑降水作业会引起周边地下水位下降，导致土体有效应力重新分布，进而改变桩-土界面力学特性（Ong.D.E.L.,et al.,2019;吴昊等,2019）。这一变化可能诱发高铁桥梁桩基产生附加沉降，对高速铁路的运营安全构成严重威胁。

国内外学者针对该问题开展了多维度研究，研究表明基坑降水会引起周边土体孔隙水压力消散及有效应力增加，从而导致土体固结沉降。当桥桩位于该沉降影响范围内，且土体沉降量大于桩基沉降时，桩-土相对位移将引发桩侧向下的负摩阻力，该负摩阻力不仅增大了桩身轴力，还可能引起桩基附加沉降，严重时会导致桩身结构损伤或桩端持力层承载力失效（Liu., et al.,2019;林超等,2023）。

在现场试验研究中,多项成果揭示了降水工程中关键参数与水土相互作用对工程安全的影响。研究发现,地下水位下降会明显改变桩侧摩阻力分布,引起中性点动态波动及桩身应力重分布(夏力农,2007),导致群桩侧移呈现非同步性,主要表现为悬臂式与鼓肚式等不同模式(曾超峰,2022),开挖过程中不同水位条件对临近高铁桥桩位移及侧摩阻力分布存在规律性影响(郝鑫,2023)。随着计算机的不断进步,推动了与工程实践更为契合的数值分析方法的发展,使得能够建立精细化的渗流场模型及基坑-桩基相互作用模型,从而能够更精确地揭示土体与结构的变形机理。高铁沿线地下水的变幅增大,将会威胁邻近桥梁桩基安全与铁路运营。为此学者们结合工程实际采用数值模拟建模的方法开展了研究,刘御刚(2014)建立了井点与基坑降水引起的附加荷载简化模型及相应应力计算公式,提出了改进的荷载传递法与中性点试算法,分别用于抽降水条件下单桩与群桩沉降计算,并通过 ABAQUS 数值模拟验证了方法的适用性。针对基坑降水对运营高铁安全构成的显著变形风险,郑灿政(2016)采用 MIDAS GTS 建立数值模型,研究了降水引发的渗流-应力-位移场演化规律,重点揭示了不同工况下临近高铁桩基的响应特性,提出了桩基变形评估方法并验证了隔离桩等防护措施的有效性。章荣军(2011)改进了隧道与基坑开挖引起的自由位移场理论预测方法,提出了能够同时考虑桩-土非线性相互作用、荷载历史效应以及纵-横向变形耦合的被动单桩与群桩分析模型,并构建了针对桩土界面剪切滑移行为的精细化数值模拟框架,提升了近接施工条件下受荷桩基响应预测的理论合理性与计算可靠性。

降水过程所引发的渗流场与应力场耦合效应、土体固结特性以及桩-土-结构动态相互作用,是导致邻近高速铁路桥梁桩基产生附加变形的主要内在机制。然而,在不同地质条件与复杂施工环境下,其具体响应规律与变形机制仍有待结合具体工程开展精细化数值建模与实证验证(Huang, et al., 2025)。当前,针对基坑降水所诱发的围护结构变形及周边建(构)筑物响应,尤其是在高铁桥梁邻近区域的降水工程影响方面,仍缺乏系统性的理论与工程总结。本文以郑州市轨道交通 8 号线一期工程胡庄站为背景,综合现场监测与数值模拟方法,深入研究基坑降水过程中邻近高铁桥梁桩基及地表的沉降演变规律。研究成果旨在为类似工程中的变形控制与安全评估提供理论依据与实践参考,并为后续相关领域的工程设计与科研提供经验支撑。

2. 工程概况

地铁站场地地貌单元属于黄河冲积泛滥平原区,勘探揭示地层自上而下依次为杂填土、黏质粉土、粉砂、细砂层、粉质黏土层、细砂层、粉质黏土层。车站主体基坑采用地下连续墙的支护形式,端头段基坑开挖深度约 12.705m,相关地

层分布如图 1 所示。胡庄站基坑东侧为京广高铁跨连霍高速公路特大桥，桥型结构为宽度 32m 简支梁桥，基础为群桩基础，承台长 11.0m，宽 6m，高 2m，桩径为 1.0m。基坑与车站主体结构最近距离约 48m，两者平面关系如图 2 所示，相关土层物理性质参数如下表 1 所示。

表 1 土层物理力学表

Table 1 Physical and mechanical tables of soil layers

部件名称	埋深 (m)	密度 (g/cm ³)	压缩模量 (MPa)	渗透 系数 (m/d)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
□ ₁ 杂填土	3.5	1.70	8.1	/	10	15.5
□ ₃₁ 黏质 粉土	6.8	1.82	7.7	0.6	10.5	22
□ ₂₂ 粉质 黏土	5	1.83	4.2	0.05	19.5	11
□ _{31D} 细砂	16	1.92	22	14	2	28
□ ₂₃ 黏质 粉土	17	1.88	13.3	0.5	13.5	23.5

场地内勘探深度范围内地下水类型为潜水，局部存在上层滞水。地下水主要赋存于粉细砂层中。车站含水层为中-强透水层。勘察期间浅部土层局部存在上层滞水，上层滞水水位埋深受降雨入渗地表下渗影响较大，无稳定水面。地下水位埋深位于地表下 8.42~13.92m，在场区内地下水总体流向由西北流向东南。

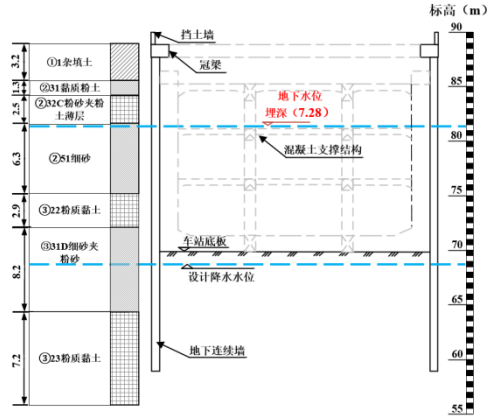


图 1 基坑水位及地质剖面图

图 2 基坑与桥梁位置平面图

Fig.1 Water Level and Geological
Profile of the Foundation Pit

Fig.2 Plan of foundation pit and bridge
location

3. 降水作用下桥桩-土体系渗流变形机理与现场试验研究

本章探讨了降水作用下桥桩-土体系的渗流变形机理，并结合现场试验深入

分析了降水扰动范围与桩-土相互作用机制。通过理论分析与现场实测相结合的方法，揭示了降水过程中地下水动力场变化引发的土-水-结构相互作用规律，重点研究了孔隙水压力重分布、非饱和土力学效应及渗流-应力耦合作用对桥桩变形的影响机制。现场试验通过在降水井外围设置多距离监测点，系统观测了不同降深条件下的水位动态与地表变形响应，发现了群桩结构对地下水渗流路径的阻碍效应及其对降水漏斗形态的畸变影响。研究成果为深入理解降水引起的桥桩-土体系相互作用提供了重要的理论支撑和实证依据。

3.1. 降水引起桥桩变形机理

在施工过程中，降水改变地下水动力场引发了土-水-结构相互作用，主要影响包括孔隙水压力重分布、非饱和土力学效应及渗流-应力耦合作用。降水导致地下水位降低，使土体中超静孔隙水压力消散，同时动态降水条件下水力梯度变化产生的渗流力可能引发土颗粒迁移或局部潜蚀，改变桩侧土体抗剪的强度（Yang, et al.,2025）。另一方面，在群桩分布下降水漏斗呈现非对称分布的特征，桩-承台-上部结构体系的差异沉降效应会进一步放大。如图 3 所示，当桥桩处于降水诱发地面沉降影响域内，且土体沉降量超过桩身沉降值时，土体与桩身界面处将形成向下作用的负摩阻力。该负摩阻力通过桩-土相对位移机制对桥桩产生下拉效应：对于摩擦桩，负摩阻力会诱发附加沉降，当同一结构部分桩体承受负摩阻力时，基底应力重分布将引发差异沉降；对于端承桩，负摩阻力导致桩身轴力显著增加，当轴力超过桩体材料抗拉强度或桩端持力层极限承载力时，可能引发桩身结构破坏或持力层剪切失效（Leung et al.,2004）。

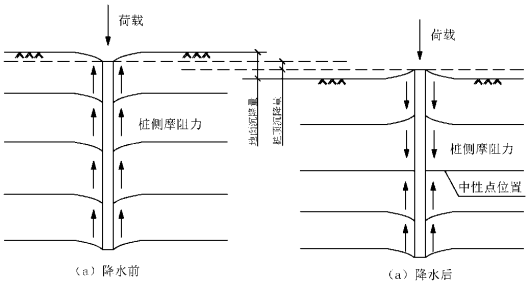


图 3 降水前后桩基受力图

Fig.3 Stress on pile foundation before and after precipitation

3.2. 现场试验的降水扰动范围与桩-土相互作用机制分析

为深入研究现场原位土体在空间分布上的非均质性、渗透系数及压缩模量等关键参数的变异性对降水引起的扰动范围的影响机制，本研究于现场开展了系统的预降水试验。通过布设不同距离的监测点，对降水引发的渗流场变化与土体响应进行综合观测与分析。具体试验设计为：在降水井外围沿垂直降水轴线方向分别设置 200m、150m、100m 和 50m 处的地下水位监测点与地表沉降监测点。采

用电子水准仪与自动水位计，对不同降深条件下的水位动态与地表变形进行连续监测，获取了大量实时数据，并据此绘制水位变化与地表沉降曲线，如图 4 所示。

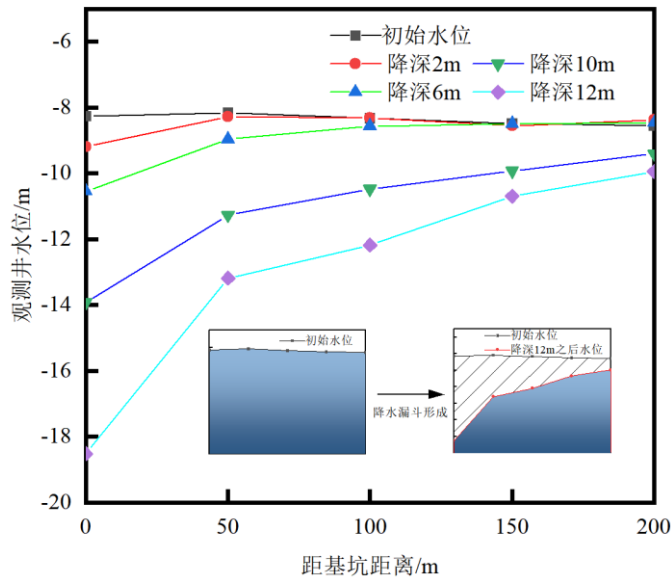


图 4 不同降深引起观测井水位变化图

Fig.4 Changes in water level in observation wells caused by different depths

试验结果显示，降水深度是控制降水漏斗形态与发展程度的关键因素。随着降深增加，降水漏斗不仅在垂向上扩展，其影响半径也显著增大，呈现出典型的非对称发展特征。值得注意的是，在距离桥桩基础较近的 50m 范围内，地下水位变化出现明显的非线性衰减，该现象与远端监测点（100 - 200m）的变化趋势存在显著差异。这种扰动衰减特性的改变主要源于桥梁群桩对地下水渗流路径的阻碍效应。群桩作为相对隔水屏障，改变了渗流场的自然分布，导致降水漏斗形态发生畸变，进一步影响其影响半径与最大降深位置。

为更全面揭示降水扰动的发展规律及其对周边地层的影响，本研究进一步对地表沉降监测数据进行了系统整理与分析，结果如图 5 所示。

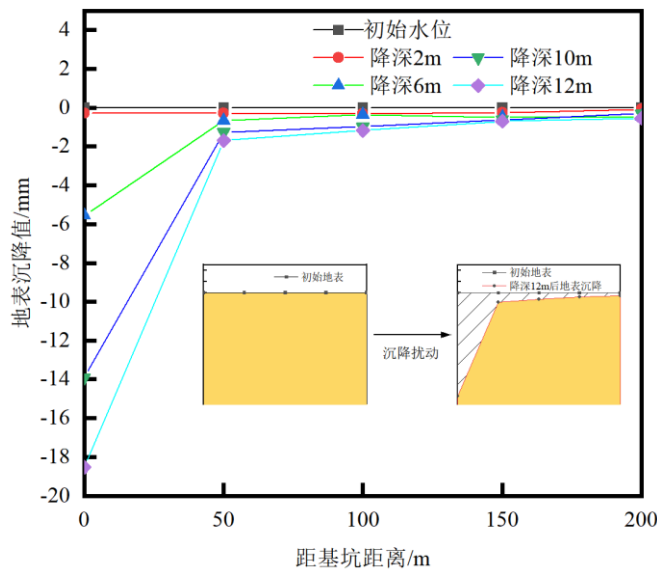


图 5 不同降深引起周边地表沉降变化分析

Fig.5 Analysis of changes in surrounding surface subsidence caused by different depths

从图中可明确看出,随着降水深度增大,因地下水位下降导致土体有效应力增大,引发明显的排水固结过程,最终反映为地表沉降量的显著增加。地表沉降的空间分布与降水漏斗形态表现出较高的一致性,其沉降等值线同样在距降水中心约 50m 处出现明显转折。这一现象进一步证实,尽管深部降水作业扩大了地下水位下降的范围,但群桩基础的存在对近桩区域的渗流场与土体应变场产生了约束作用,导致该区域出现响应拐点。该结果说明,桩-土相互作用在降水扰动响应中扮演重要角色,在实际工程降水设计与周边环境影晌评估中需予以充分考虑。

本次现场原位预降水试验结果表明,降水深度与降水漏斗的影响半径和深度呈正相关,群桩结构在 50m 范围内对地下水渗流路径产生显著阻碍作用,导致水位下降出现非线性衰减并改变天然渗流场分布。试验同时观察到地表沉降曲线与降水漏斗形态高度一致,随着水位下降土体有效应力增大引发明显固结沉降,且在 50m 处出现由桩-土相互作用导致的沉降拐点。试验结果从机理上印证了多孔介质渗流理论与有效应力原理在群桩-土相互作用条件下的适用性,揭示了结构性障碍对渗流-应力耦合场的控制机制,为类似场地的降水扰动评估提供了可靠的原位测试方法与理论依据。

4. 基于 Abaqus 数值模拟的桥梁扰动分析

为分析基坑降水对高铁桥梁的扰动影响,本章采用 Abaqus 有限元软件,分析地铁车站基坑降水施工对邻近高架桥桩基的影响。通过建立精细化三维数值模型,模拟了 2m、6m、10m 和 12m 四种不同降深工况,重点研究了降水过程中桥桩周边地表沉降、桥桩自身沉降变形、横向变形以及侧摩阻力变化等关键响应特征。研究揭示了降水深度与桩基变形之间的内在联系,发现了临界深度效应的存在,为地铁施工中降水深度的控制提供了重要的理论依据和工程指导。

4.1. 数值模型建立

为研究地铁车站基坑降水施工对邻近高架桥桩基的影响,以及可视化深层降水时桥桩的变形规律,通过 Abaqus 软件进行模拟分析。考虑实际工况及计算成本,对依托工程相关部件进行简化,将地铁车站降水施工时群井抽水方法简化为大井法,并选取一个桩基整体建立数值模型进行分析。设计三维数值模型的尺寸为 $200\text{m} \times 75\text{m} \times 60\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),整个模型共有单元 164364 个,节点 214833 个,并进行基本假定如下:

(1) 假定土层为水平均质土,且土体为各向同性的理想弹塑性体,土体采

用土体摩尔-库伦本构模型；

(2) 再降水施工开始前，土体已经在自重作用下完成固结，忽略施工前土体的自重影响与变形；

(3) 模型始终处于稳定状态，围护结构为混凝土灌注桩与冠梁组合的结构，且假定其材质为理想均匀弹性材料；

(4) 地下水渗流服从 Darcy 渗流定律，且降水完成后地下水水位稳定。

通过设置孔隙水压力大小模拟降水工况，并保持与现场试验相同的 2m、6m、10m、12m 降深工况。模型前后两面施加 Y 方向的位移约束，模型两侧施加 X 方向的位移约束，模型底面施加 Z 方向的位移约束，模型上表面为自由面，保证模拟沉降变形效果。具体模型形态与划分方式如下图 6 所示。

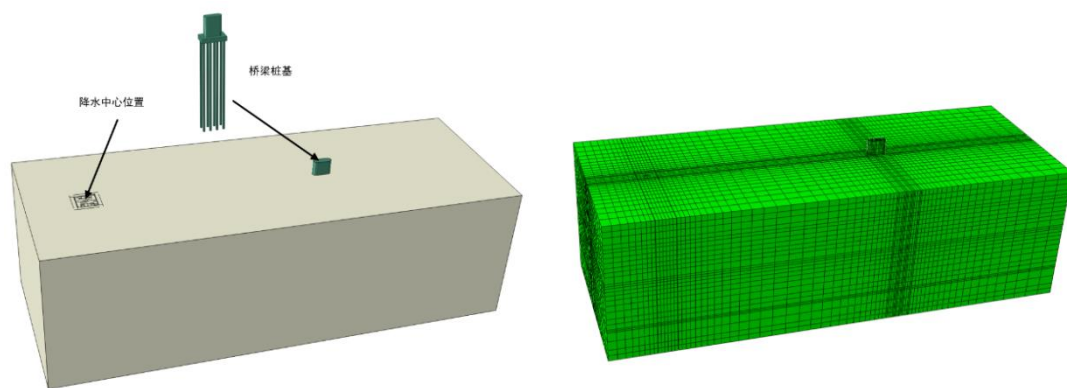


图 6 数值模型建立示意图

Fig.6 Schematic diagram of numerical model establishment

4.2. 不同降深引起桥桩周边地表沉降分析

分别整理不同降深引起桥桩周边土体沉降云图，如图 7 所示。图中空缺是为保证沉降云图效果而对部分单元进行了隐藏。由图可以发现，桥梁桩基的存在对其周边地表沉降存在影响，桥桩结构改变了原有地下水的渗流形态，改变了水力梯度的分布，形成绕桩渗流的特殊模式。这种现象导致桥桩周边土体的有效应力增量小于与其他部分，固该区域范围内的地表沉降量较小，与现场监测表现出的规律一致。

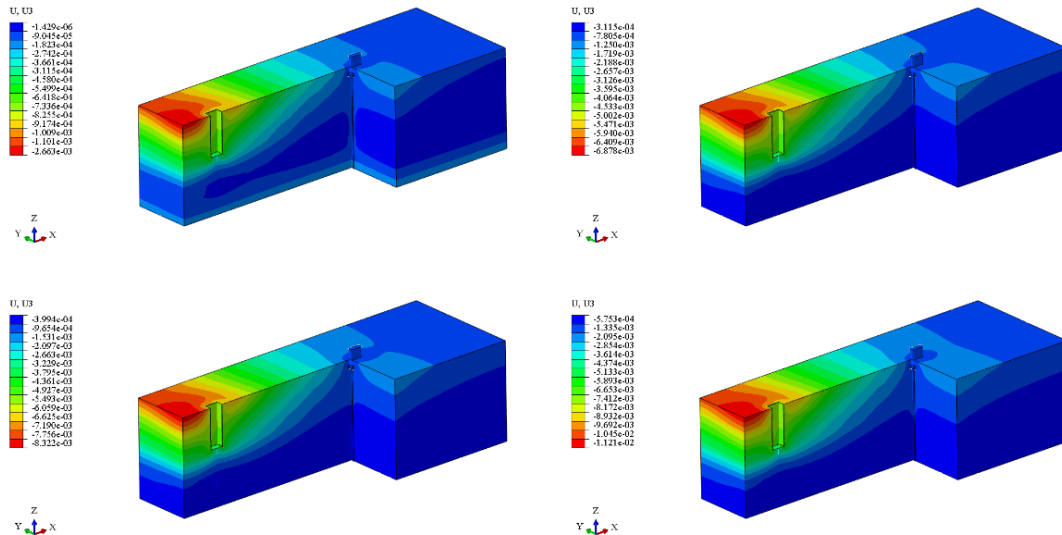


图 7 不同降深引起桩基及周边土体的位移云图（单位 mm）

Fig.7 Cloud map of displacement of pile foundation and surrounding soil caused by different depths (Unit: mm)

4.3. 不同降深引起桥桩沉降变形分析

在降水过程中，基坑内外形成的水力梯度差会驱使地下水向降水中心渗流，并在基坑周边的一定范围内产生降水漏斗，而降水漏斗的不均匀分布会形成不规则的土体应力场，最终导致桥桩的差异沉降。如下图 8 为降水引起桥桩沉降变形云图。通过对比数据可以明显发现，随着降水深度的增加，桥桩沉降量明显增加，且不均匀沉降值变大；而靠近降水中心一侧的桥梁桩基沉降量更大，桩基最大横向位移随降水深度增加呈现非线性增长，尤其在降深 10m 后显著加剧。在降深 10m 之前，两者不均匀沉降差值很小，为 0.04mm，表明桥桩并未明显收到降水施工的影响；对比降深 12m 桥桩沉降数据，可以明显发现桥桩不均匀沉降值变大至 0.81mm。这种变化表明了降水施工对邻近桥桩的影响存在临界深度效应，浅层降水对桥桩影响相对有限，而深层降水则会引发显著的不均匀沉降，因此在实际施工过程中需要注意降水深度的控制，避免桥桩周围地下水位差异过大而引起的不均匀沉降。

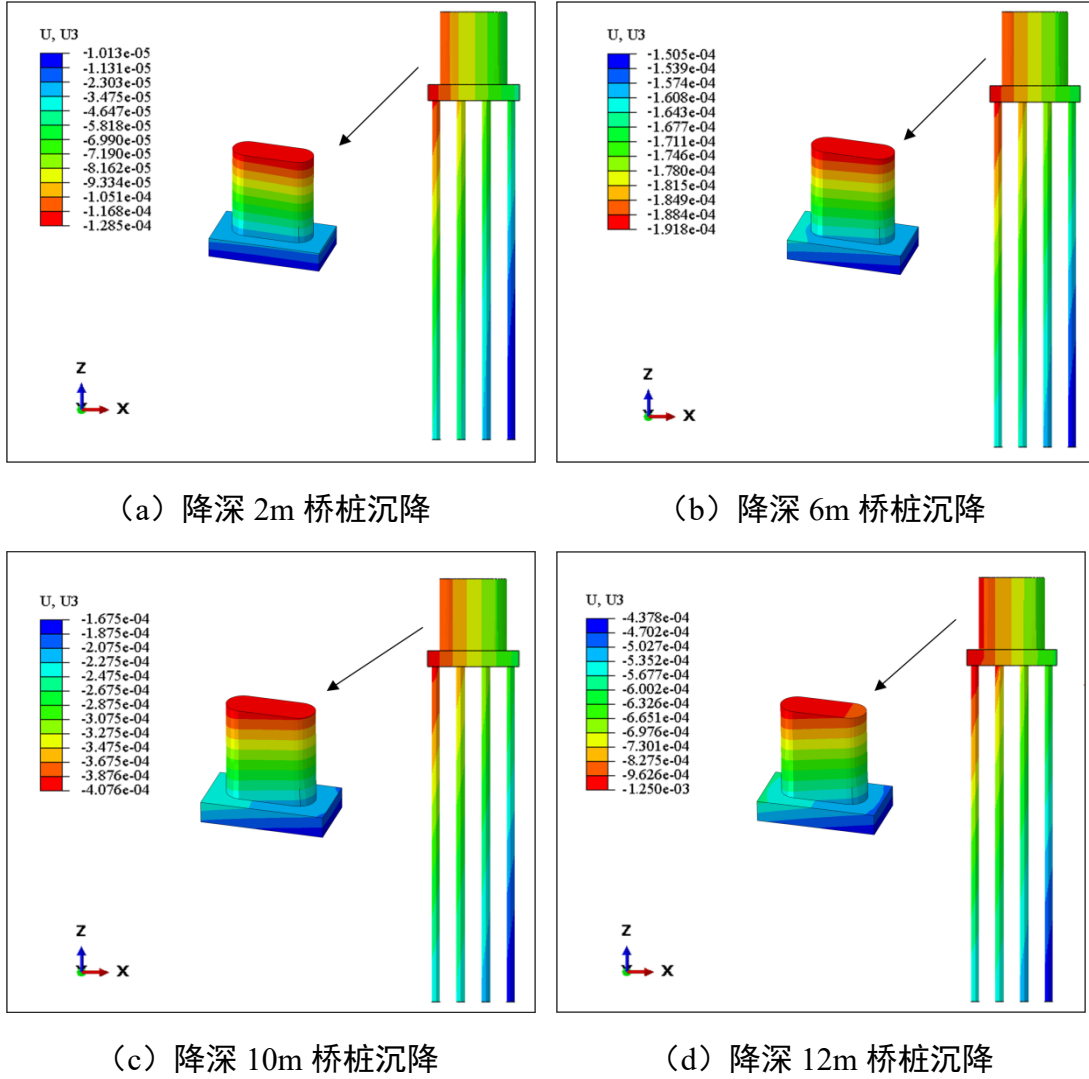


图 8 不同降深引起桥桩沉降云图 (单位: mm)

Fig.8 Settlement displacement nephograms of pile foundation induced by different drawdown depths (Unit: mm)

4.4. 不同降深引起桥桩横向变形分析

在地下水向降水中心渗流的过程中,会产生一定的横向渗流应力,与土体压缩产生的负摩阻力共同作用于桥桩,影响桥桩性状。提取模型中桥桩横向位移数据整理成不同工况下桥桩横向位移绘制如图 9 所示。由变形规律可以看出,桥梁桩基的横向变形值与沉降变形值均在降深 10m 后增加量变大,分析原因是因为在降深未达到一定深度时,地下水渗流尚未对临近桩基产生扰动,而在达到某一临界值后,受到土体固结沉降与渗流应力等多重影响,产生了横向变形。在降水开始初始阶段,渗流影响范围有限且土体处于微变形阶段,桩基横向变形基本保持稳定。随着降水深度的增加,渗流场逐渐扩展至桩基影响区,桩基开始出现差异变形,但整体变形增速仍较缓慢。当降深超过 10m 后,变形速度加剧,桩基出

现了较为明显的差异沉降。因此降水深度是影响土体扰动范围的关键因素，针对这一规律，可在降深超过一定深度时加强对桥桩的控制。

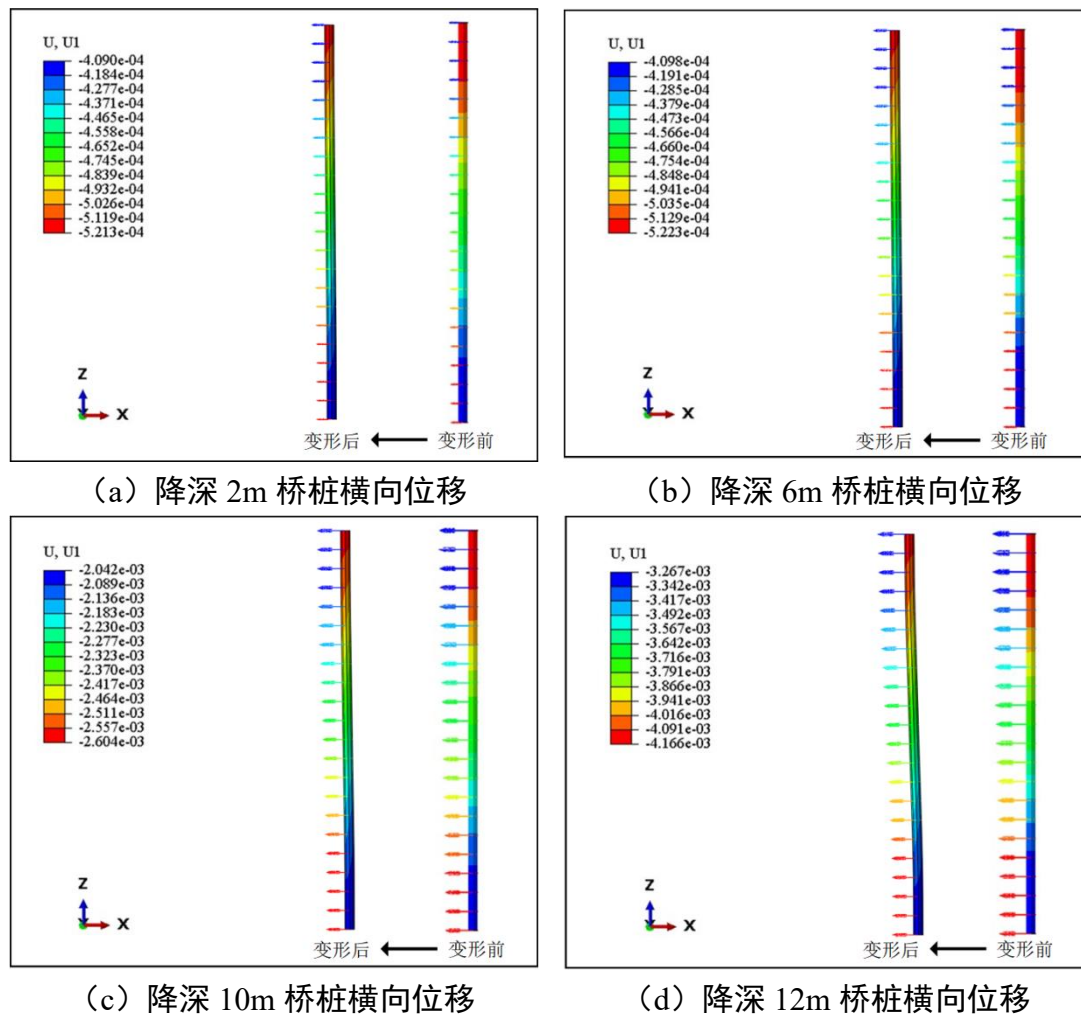


图 9 不同降深引起桩基横向位移云图 (单位 mm)

Fig.9 Cloud map of lateral displacement of pile foundation caused by different depths (Unit: mm)

4.5. 不同降深引起桥桩侧摩阻力变化分析

图 10 为不同降水深度引起桥桩侧摩阻力变化对比图。由图中可以看出，在地下水位下降后，桥桩桩身上部均出现负摩阻力，随着降水深度的增加，桩身上部负摩阻力逐渐增大，桩身中性点位置随降水深度的增加而下降，而与前述变形规律一致的是，降深 2m 与降深 6m 对桥桩侧摩阻力影响较小，在降深达到 10m 后，桩身上部侧摩阻力明显增加，表明桥桩受到了地下水位下降的影响。降水深度为 12m 时，桩身上部最大负摩阻力为 53.86kPa，桩身下部最大正摩阻力为 75.46kPa，中性点位置在埋深 12.36m 处。

从渗流-应力耦合作用来看，当降水深度较小时，土体有效应力增长主要发生在上部土层，对桩-土界面剪切特性的影响范围有限。而当降深超过 10m 后，

深层土体孔隙水压力消散，导致桩周土体产生更大范围的固结沉降。这种大范围的土体沉降使得桩身上部更多区段出现土体沉降大于桩身沉降的情况，从而扩大了负摩阻力的作用范围，并促使中性点下移，与桥桩沉降及横向变形规律一致。

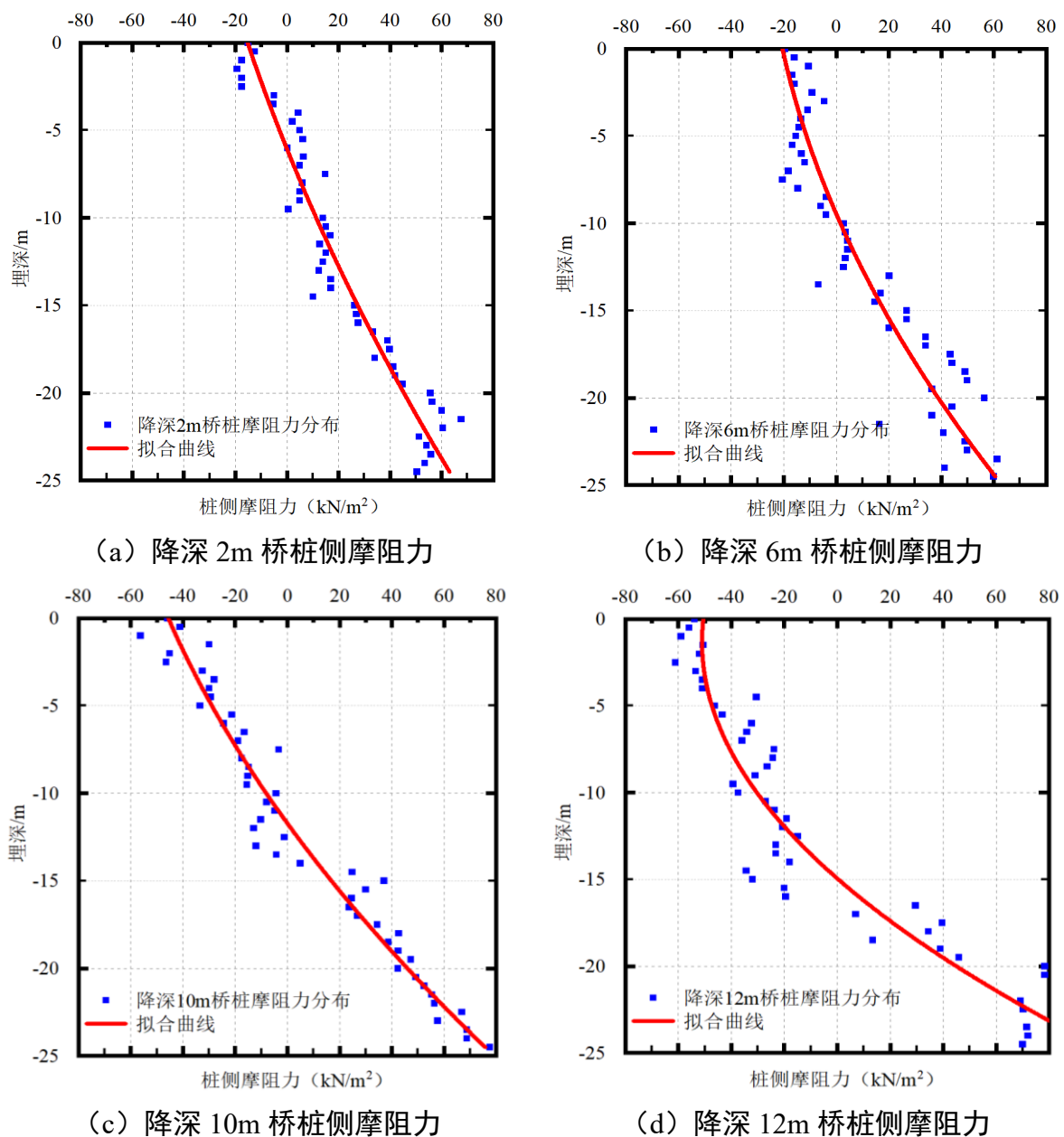


图 10 不同降深引起侧摩阻力变化图

Fig.10: Changes in lateral friction caused by different depth reductions

5. 实际施工监测与关键控制举措研究

5.1. 施工过程桥桩变形监测

主体基坑于 2021 年 8 月开始降水开挖作业，并于 2022 年 8 月停止降水，与预降水试验不同的是，在基坑施工过程中需要长时序进行地下水抽取，因此桥桩

的变形控制要求更为严格。通过桥梁桥墩上设置沉降监测点并进行监测，并记录从开始降水到停止降水全过程中的桥墩沉降数据，以反映桥梁的沉降情况。整理施工过程中沉降数据如下图 11 所示。

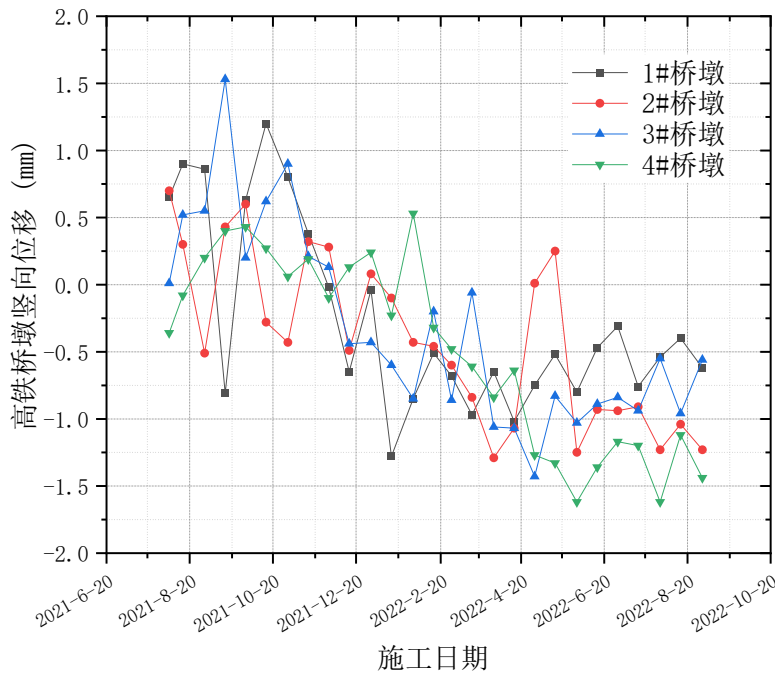


图 11 胡庄站邻近高铁桥墩竖向位移监测结果

Fig.10 Monitoring results of vertical displacement of high-speed railway bridge piers near Huzhuang Station

为减小施工过程中的扰动，在 2021 年 12 月前，水位下降值保持在 10m 左右，结果显示最大桥墩沉降值为-0.22mm，表明此时桥梁基础未受到降水的明显扰动。根据前述研究结果，在降深达到 10m 左右时现场采用了分级降水的方法，保证地下水位缓慢下降，有效避免了单次降深过大引发土体失稳。最终桥墩产生的最大沉降为-1.62mm，避免对邻近桩基产生扰动影响。

5.2. 临近高铁桥梁降水防控关键举措

在面临基坑开挖卸荷及邻近高铁振动荷载双重作用时，需构建具有高刚度的防渗支护体系。针对砂性土层，优先选用穿透软弱层并嵌入稳定岩层的地下连续墙，形成封闭式挡土屏障。对于强渗透性砂层，利用地下连续墙本身阻断渗流路径，并按需进行坑内疏干，严格控制抽水速率。本依托工程地层渗透系数大、地下水补给迅速、邻近高铁桥梁桩基等因素，采用地连墙作为落底式止水帷幕，且地勘资料表明，③₂₃粉质黏土层的渗透系数为 $5.79 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，属于不透水层。因此地连墙进入③₂₃粉质黏土层，有效的阻断基坑内部地下水与外部联系。坑外设置兼具水位观测与回灌功能的井点，实时维持高铁桥桩周边地下水位稳定，防止

土体承载力因失水而降低。内支撑系统宜采用钢-混凝土组合结构，并应用分层预加应力技术，以有效分散侧向土压力。开挖作业严格遵循“先远后近、对称分层”原则，每层开挖深度控制在 1~2 米后立即架设支撑。对于紧邻高铁桥桩的关键区域，采用阶梯式开挖结合预留土台的技术措施，防止荷载集中导致结构变形和地表沉降。

另一方面，建立地下水渗流-结构耦合的本构模型，运用智能算法优化参数反演过程，降低地质条件的不确定性影响；同时可以利用遥感与地理信息系统获取高精度地形数据，为数值模拟提供准确的边界条件。建立“实时监测-动态反馈”机制，高频采集支护结构变形、地下水位及地表沉降数据，同步输入数值模型进行动态分析。根据分析结果，及时优化降水方案与支护参数，形成以支护控制、降水优化、监测预警为核心的综合保障体系，确保高铁运营安全。

6. 结论

本文对郑州市位于富水砂层地层中的地铁深基坑车站开展预降水试验，并通过数值模拟对桥桩深层扰动进行了分析，最后保证施工的顺利实施与高铁的安全运营，得出主要结论如下：

（1）通过车站深基坑预降水试验发现，随着降水深度的增加，基坑内降水漏斗与地表沉降呈现范围扩展、深度增加的特征。但从距离桥桩附近的 50m 监测断面开始，地下水位变化幅度随与桥桩距离的增加逐渐减弱，分析原因是桥梁群桩形成阻碍了地下水向降水中心渗流的路径。

（2）基于 Abaqus 软件对不同降深下桥桩位移变形进行模拟分析。发现在降深较小时，桥梁桩基总体变形量较小，降水并未明显影响桥桩形状；随着降水深度达到 10m 后，扰动显著加剧。在达到目标降深 12m 时，桥桩最大不均匀沉降差为-2.201mm；受深基坑降水影响，桥桩上部负摩阻力明显有增加现象，桩身上部负摩阻力逐渐增大，且存在负摩阻力的桩身长度也随之增大，同时，桩身中性点位置下降，且桩底部的正摩阻力增加。

（3）根据试验与模拟结果指导，在降深达到 10m 时采用多级降水的方法控制地下水位变化，最终保持桥墩最大沉降为 1.62mm，满足了高铁桥墩沉降标准要求。最后提出了临近高铁桥梁降水防控关键举措。

References

Ong,D.E.L., Leung,C.F., Chow,Y.K., 2009. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(10): 1462-1474.

- Liu,Y., Xiang,B. Fu,M., 2019. Influence of dewatering in deep excavation on adjacent pile considering water insulation effect of retaining structures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(6): 5123-5130.
- Huang,Q., Wu,Y., Huang, S., et al., 2025. Numerical tests on dynamic response of embankment with pile-supported foundation for high-speed railway in soft ground using soil – water coupling elastoplastic FEM. *Scientific Reports*, 15(1): 5651.
- Yang,Q., Chen,S., 2025. Research on the deformation mechanism and law caused by the influence of seepage on foundation pit dewatering. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1523165.
- Leung,C.F., Liao,B.K., Chow,Y. K., et al., 2004. Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load. *Soils and Foundations*, 44(6): 17-26.

附中文参考文献

- 仕鹏张, 2025. 道路桥梁工程跨越既有交通线路施工的难点及技术措施研究. *工程建设*, 2025, 8(1): 102-104.
- 何洪文, 孙逢春, 李梦林, 2023. 我国综合交通工程科技现状及未来发展. *中国工程科学*, 2023, 25(6): 202-211.
- 吴昊, 姚顺意, 薛勋强, 等, 基于渗流应力耦合的基坑降水及开挖对邻近桥桩的影响分析. *公路交通科技*, 2019, 36(10): 59-66.
- 林超, 姜蓉, 肖树聪, 等, 2023. 盾构近接施工对摩擦桩基承载性能的影响机制及控制技术研究. *岩土工程学报*, 45(S2): 241-246.
- 夏力农, 2007. 桩基负摩阻力特性的理论与试验研究(硕士学位论文). 长沙:中南大学.
- 曾超峰,孙海昱,薛秀丽,等, 2022. 多含水层体系基坑抽水诱发邻近建筑桩基受力变形特性. *土木工程学报*: 1-12.
- 郝鑫, 2023. 地铁车站基坑降水对临近高铁桥梁桩基变形影响分析(硕士学位论文). 郑州:华北水利水电大学.
- 刘御刚, 2014. 抽降水对高速铁路桥梁桩基的影响分析(硕士学位论文). 长沙:中南大学.
- 郑灿政, 2016. 深基坑工程降水对既有高铁桥梁桩基的影响研究(硕士学位论文). 南京:东南大学.
- 章荣军, 2011. 土体开挖引起的邻近受荷桩基附加响应分析(硕士学位论文). 武汉:华中科技大学.