

软弱夹土层场地预应力管桩形状对沉桩过程的影响

王海宁¹, 秦永亮¹, 王培森²

(1. 中国安能集团第二工程局有限公司, 江西 南昌 330000; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 预应力混凝土管桩(PC管桩)以其桩身质量可靠、适应性强、造价经济等优点,常被用于处理各种复杂地质工况。文章以河南某科技产业园实际工程为例,基于CEL法,运用有限元软件ABAQUS构建土体(欧拉体)-桩基(实体)三维数值模型,考虑实际沉桩过程中PC管桩桩长及桩径的不同及相同桩尺寸下沉桩速度不同,对比分析桩周软弱夹土层的应力及沉降量与桩基沉桩时间的响应规律。研究表明:1)相同桩尺寸下沉桩速度不同,软弱夹土层应力及沉降量变化所呈规律一致;2)当桩径相同时,软弱夹土层同一土体单元的应力及沉降量均随桩长的增加而增大;当桩长相同时,与桩外表面相同距离的软弱夹土层土体单元的应力及沉降量随桩径的增大而增大;3)通过综合考虑,给出符合实际工程的预应力混凝土桩的尺寸。本文研究成果可为软弱夹土层场地下预应力混凝土管桩的施工关键技术提供重要的理论依据。

关键词: 预应力管桩; 软弱夹土层; 沉桩过程; CEL方法; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)03-0055-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.03.037

Impact of prestressed concrete pipe pile shape on the driving process in site of weak soil interlayer

WANG Haining¹, QIN Yongliang¹, WANG Peisen²

(1. China Anneng Group Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330000, Jiangxi, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: Prestressed concrete pipe piles (PC pipe piles) are often used to deal with various complex geological conditions due to their advantages of reliable pile quality, strong adaptability and economical cost. Taking the actual project of a science and technology industrial park in Henan Province as an example, using the finite element software ABAQUS and CEL method to construct a three-dimensional numerical model of soil body (Euler body) and pile foundation (solid), and considering the difference in the length and diameter of PC pipe piles and the different sinking speed of the same pile size in the actual pile sinking process, the response law of the stress and settlement of the weak soil interlayer around the pile and the pile sinking time of the pile foundation are compared and analyzed. The results show that the changes of stress and settlement in weak soil interlayer are consistent with the different sinking speeds of the same pile size. When the pile diameter is the same, the stress and settlement of the same soil body unit in the weak soil interlayer will increase with the increase of pile length. When the pile length is the same, the stress and settlement of the soil body unit of the weak soil interlayer at the same distance from the outer surface of the pile will increase with the increase of pile diameter. Through comprehensive consideration, the size of the prestressed concrete pile in line with the actual project is given. The research

收稿日期: 2024-04-17

作者简介: 王海宁(1988—),男,高级工程师,从事工程技术方面的研究工作。

通信作者: 王培森(1982—),男,副教授,从事桩基础及施工技术方面的研究工作。

results can provide an important theoretical basis for the construction of key technologies of prestressed concrete pipe piles under the site of weak soil interlayer.

Key words: prestressed pipe piles; weak soil interlayer; pile sinking process; CEL method; numerical simulation

预应力管桩是由先张法预应力工艺和离心成型制成的空心状混凝土预制构件,相比现场灌注桩,具有施工快、造价低、质量稳定且具有较高的承载力的优势。基于其独有的特点,预应力管桩开始成为建筑施工中的主导桩型,被广泛应用于不良地基承载力的提高^[1]。然而,预应力混凝土管桩施工质量与地层情况密不可分,复杂特殊的地层会对预应力管桩的施工质量造成一定程度的不良影响^[2]。

近年来,众多学者对复杂地质条件下预应力混凝土管桩的施工技术及关键问题进行了研究和探索。戴轩等^[3]以天津成层软土地质条件下采用桩筏基础的高层建筑为背景,对 PHC 管桩在地震荷载下的内力进行研究,发现在地震荷载作用下,桩筏基础角桩将产生较大的内力,减少承台对管桩转动自由度的约束,可有效改善其抗震性能;有地下室的结构在地震荷载下的桩顶内力将小于无地下室的结构,改良桩顶周围土体的性质可明显降低地震荷载作用下的管桩顶部内力。凌造等^[4]以随钻跟管工法桩为背景,基于泥质粉砂岩地区 5 组桩径为 500 mm 的 PHC 管桩桩端现场静载破坏性试验,分析了不同条件下嵌岩 PHC 管桩的桩端承载性能及宏观破坏模式,并提出桩端承载力计算方法。刘怡林等^[5]利用商业化有限元软件分别对抗滑桩加固均质边坡和含软弱夹层边坡情况进行三维强度折减弹塑性有限元数值分析,发现对于加抗滑桩的均质边坡,边坡稳定性受桩距和桩刚度的影响,滑动面受桩距的影响。以上研究虽考虑了预应力混凝土管桩在施工过程中遇到软弱土层等复杂地质的情况,却没有深入研究不同管桩长度及直径对软弱土层的影响。庄一舟等^[6]以预应力高强混凝土管桩试验模型为背景,进行了 PHC 管桩低周往复荷载拟静力试验,得到了 PHC 管桩桩身破坏特点、沿桩深方向上桩身水平位移与应变、骨架曲线和滞回性能曲线,初步探讨了桩-土相互作用机理,给出了 PHC 管桩-土相互作用的等效刚度计算方法。乔赵阳等^[7]为

了解桩、土参数对 PHC 管桩在单调荷载作用下变形的影响,分析配筋率、桩基入土深度、土体不排水抗剪强度、轴压比等参数对 PHC 管桩极限变形的影响规律,发现桩基极限位移随桩基配筋率的提高而增加,但随桩基入土深度、土体不排水抗剪强度、轴压比的增加而减少,并拟合单调荷载作用下的 PHC 桩基极限位移的计算公式。以上研究对比分析了 PHC 管桩与周围土体相互作用产生的力学性能和变形能力,没有考虑存在软弱夹土层等不良地质的情况,且未探究土层在沉桩时的影响,在实际工程中缺少普遍性。

本文以某科技产业园 PC 管桩实际施工工程为例,基于有限元软件 ABAQUS 运用 CEL 法构建土体(欧拉体)-桩基(实体)三维数值模型,通过提取桩周软弱夹土层在插桩过程中的应力-时间曲线与位移-时间曲线,研究 PC 管桩相同尺寸下沉桩速度不同对软弱土层的影响,分析在 PC 管桩施工过程中不同桩长及桩径下软弱夹土层应力和沉降量的响应规律,以期为软弱夹土层场地下预应力管桩的施工关键技术提供重要的理论依据。

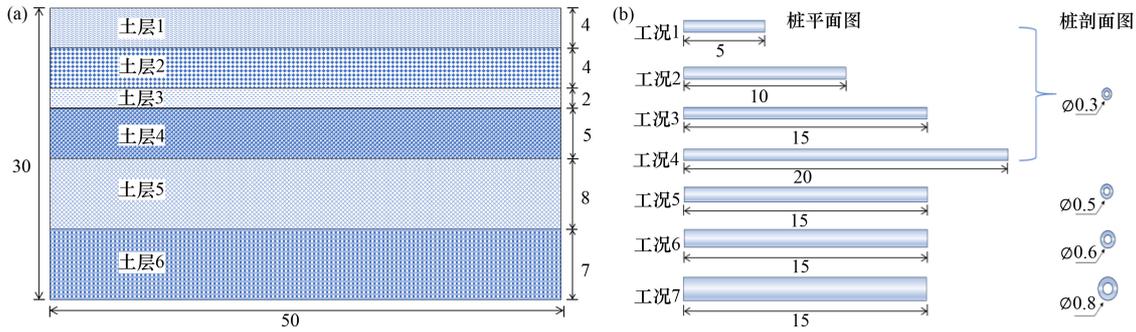
1 工程概况

某科技产业园 PC 管桩施工工程所在场地为可耕地,地形稍有起伏,属黄河冲积平原地貌单元。经钻探,地层为第四系全新统河流相及上更新统河湖相沉积层,其岩性主要为粉质黏土、粉土、粉砂等。工程总占地面积约为 130 万平方米,主要包括工业厂房、办公楼等。土体模型参数参照办公楼地下土体参数设置,场地土层具体参数如表 1 所示。

根据实际施工过程设置 11 个工况,对比分析相同桩尺寸下沉桩速度不同对软弱土层的影响及不同桩长及桩径对周围软弱夹土层的影响规律。不同工况设置如表 2 所示,土体分层及不同工况桩示意如图 1 所示,根据地勘报告,土层 3 弹性模量相对其他土层明显较小,是场地中典型的软弱夹层。

表 1 土层相关参数

土层编号	厚度/m	深度/m	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	摩擦角	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa
1	4	0~4	1 970	0.31	20	25	169
2	4	4~8	1 910	0.28	18	40	223
3	2	8~10	1 860	0.27	20	20	65
4	5	10~15	1 960	0.30	18	15	262
5	8	15~23	1 950	0.29	20	20	312
6	7	30	1 960	0.26	25	25	343



(a) 土体分层; (b) 不同工况桩

图 1 土体分层及不同工况桩示意

表 2 不同管桩工况对比

工况号	管桩桩径/m	管桩空心桩径/m	桩长/m	沉桩速度/($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)
1	0.4	0.20	15	1.5
2	0.4	0.20	15	2.0
3	0.4	0.20	15	2.5
4	0.4	0.20	15	3.0
5	0.4	0.20	15	3.5
6	0.4	0.20	5	1.0
7	0.4	0.20	10	1.5
8	0.4	0.20	20	3.5
9	0.5	0.25	15	2.5
10	0.6	0.30	15	2.5
11	0.8	0.40	15	2.5

2 数值模型介绍

采用大型有限元通用软件 ABAQUS 构建土体(欧拉体) - 桩基(实体)三维数值模型。土体长度、宽度均为 50 m, 深度为 30 m, 在土体上层覆盖 2 m 空气区域, 桩基根据不同工况建立相应模型。混凝土本构采用 ABAQUS 自带的混凝土塑性损伤模型模拟其力学行为, 预应力混凝土管桩模型采用三维可变形实体创建, 其材料参数: 密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 32.5 GPa , 泊松比为

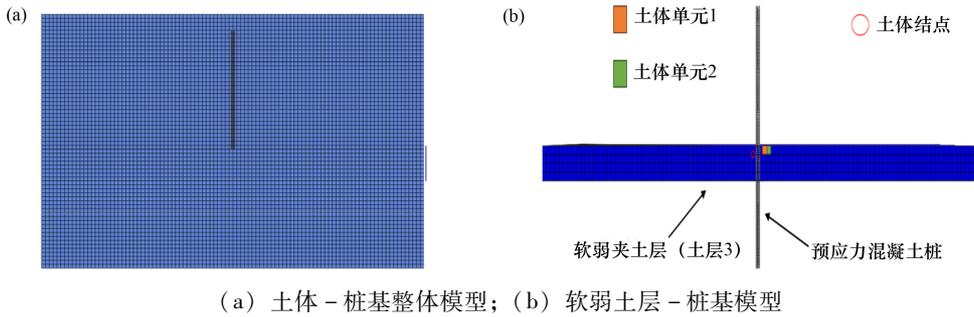
0.2; 土体本构部分采用 DP 本构, 用三维欧拉实体创建土体, 其相应参数根据表 1 确定。

由 ABAQUS “相互作用” 模块中的 “通用接触”, 定义土体与预应力管桩的接触特性: 法向约束采用 “硬” 接触、切向约束采用 “罚” 接触且摩擦系数设置为 0.3; 土体边界采用 “绑定连接”。“分析步” 模块中创建 “动力, 显示” 分析步。为简化管桩施工过程, 在 “荷载” 模块中的 “边界条件” 设置管桩沉降速度, 如表 2 所示。由于 CEL 法计算资源费时巨大, 土体采用三维欧拉体离散, 网格最大尺寸为 0.5 m; 对预应力管桩进行三维实体单元网格细化, 网格尺寸为 0.25 m。基于 ABAQUS 建立场地的土体(欧拉体) - 桩基(实体)三维有限元模型, 如图 2 所示。

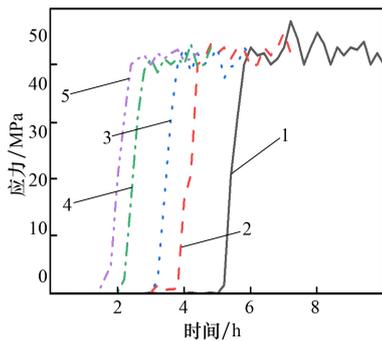
3 软弱土夹层管桩施工过程及影响因素分析

3.1 相同桩不同沉桩速度下土体单元应力响应

研究 PC 管桩相同尺寸下不同沉桩速度对软弱土层的影响, 提取图 2 所示的软弱夹土层单元 1 的应力 - 时间曲线和结点的位移 - 时间曲线。图 3 为相同桩不同沉桩速度下土体单元应力 - 时间曲线。由图 3 可知: 在不同沉桩速度下, 土体单元的应力变化规律基本一致, 均在桩插入软弱夹土层时产生



(a) 土体 - 桩基整体模型; (b) 软弱土层 - 桩基模型
 图 2 基于土体(欧拉体) - 桩基(实体)的三维有限元模型(工况 3)



工况号: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5。

图 3 相同桩不同沉桩速度下土体单元应力 - 时间曲线
 应力突变。沉桩速度慢时, 其应力波动较大, 这是因为软弱夹层受桩自身重力的影响较大。

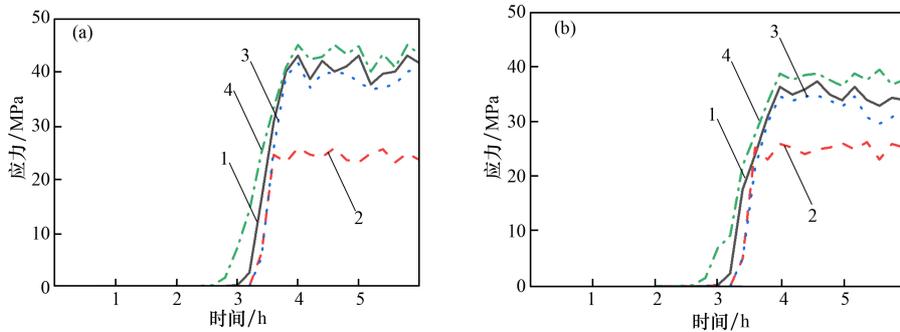
3.2 不同桩长下土体单元应力响应

考虑不同桩长对沉桩过程的影响, 提取图 2 所示的软弱夹土层单元的应力 - 时间曲线和结点的位移 - 时间曲线。图 4 为工况 3、6~8 土体单元 1、2 应力 - 时间曲线。由图 4 可知: 在桩未完全插入软弱夹土层时, 不同工况下软弱夹土层的应力变化不明显, 过程中桩对软弱夹土层未产生明显扰动; 在桩插入软弱夹土层之后, 不同工况下软弱夹土层的应力产生明显变化, 并且随着桩长的增长, 桩周软

弱夹土层的应力呈增大趋势。土体单元 1 在工况 3、6~8 的最大应力分别为 43.32、25.96、41.98、45.33 MPa, 工况 8 比工况 6 增大了 7.98%、工况 3 比工况 6 增加了 3.19%、工况 8 比工况 3 增大了 4.64%; 土体单元 2 在工况 3、6~8 的最大应力分别为 37.51、26.38、34.93、39.67 MPa, 工况 8 比工况 6 增大了 13.57%、工况 3 比工况 6 增大了 7.38%、工况 8 比工况 3 增大了 5.76%, 说明桩长的增加对软弱夹层的扰动增大, 土体应力增大。

3.3 不同桩长下软弱夹土层位移响应

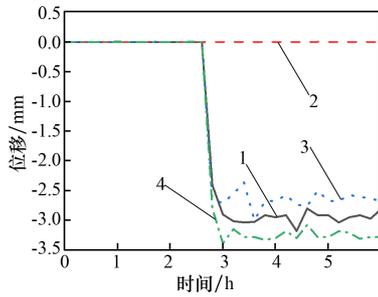
图 5 为不同桩长下土体结点的位移 - 时间曲线。由图 5 可知: 不同工况下, 在桩刚插入时均产生相同的位移沉降, 这与上面桩未插入软弱土层的应力 - 时间曲线结果相对应。在桩完全插入软弱土层时, 工况 3、7、8 的位移曲线发生突变, 而工况 6 未发生变化, 是由于该桩长度未达到软弱土层的深度。工况 3、7、8 的最大位移量分别为 3.0、2.7、3.3 mm, 工况 8 比工况 6 增加了 22.22%、工况 3 比工况 6 增加了 11.11%、工况 8 比工况 3 增加了 10%。当桩完全插入软弱夹土层时, 桩长越长对软弱夹土层的挤压作用越明显,



土体单元: (a) 1; (b) 2

工况号: 1—3; 2—6; 3—7; 4—8。

图 4 不同桩长下土体单元应力 - 时间曲线



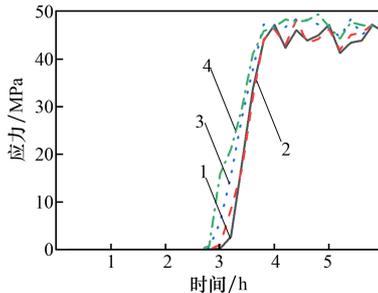
工况号: 1—3; 2—6; 3—7; 4—8。

图5 不同桩长下软弱夹土层位移-时间曲线

软弱夹土层的沉降量越大。

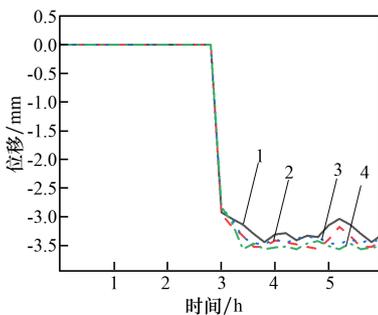
3.4 不同桩径下土体单元应力位移响应

桩径变化时,不同工况选取与桩外边面相同距离的土体单元和结点进行分析。图6为不同桩径土体单元应力-时间曲线。由图6可知:桩插入软弱夹土层之后,呈现出随着桩径的增大,桩周软弱夹土层的应力也随之增大的规律,工况3土体单元最大应力值为47.22 MPa,工况9~11的最大应力值分别为48.29、48.48、49.45 MPa。图7为不同桩径土体结点的位移-时间曲线。由图7可知:桩未插入软弱夹土层时,桩径的变化对软弱夹土层沉降量没有影响;桩完全插入软弱夹土层后,位移量随桩径的增大而增大,工况3的最



工况号: 1—3; 2—9; 3—10; 4—11。

图6 不同桩径下土体单元应力-时间曲线



工况号: 1—3; 2—9; 3—10; 4—11。

图7 不同桩径下软弱夹土层位移-时间曲线

大位移量为3.44 mm,工况9~11的最大位移量分别为3.55、3.47、3.56 mm。

综上,桩径越大,离桩相同距离的软弱土层的应力和沉降量随之增大。表明桩径变大后,预应力混凝土管桩沉入软弱夹层过程中对软弱夹层的影响范围变大。

4 结论

(1) 桩未完全插入软弱土层时,桩对临近软弱夹土层的扰动不大,不同工况软弱夹层的应力及位移沉降量变化不明显,且最大误差不超过10%,说明该方法具有一定的可靠性。桩插入软弱夹土层后,软弱土层受桩的影响其应力及沉降量发生突变。

(2) 相同桩尺寸不同沉桩速度,土体单元的应力变化规律基本一致,均在桩插入软弱夹土层时产生应力突变;在桩沉入软弱土层后,由于软弱夹层受桩自身重力的影响,沉桩速度慢时,其应力波动较大。

(3) 土体单元1在工况3、6~8的最大应力分别为43.32、25.96、41.98、45.33 MPa,土体单元2在工况3、6~8的最大应力分别为37.51、26.38、34.93、39.67,土体节点在工况3、7、8的最大位移量分别为3.0、2.7、3.3 mm,说明当桩长变长,使得桩插入土体的深度越深,对土体产生较大扰动,导致土体变形和相互作用增加,土体应力和沉降量增大。

(4) 工况3土体单元最大应力值为47.22 MPa,工况9~11的最大应力值分别为48.29、48.48、49.45 MPa;工况3的最大位移量为3.44 mm,工况9~11的最大位移量分别为3.55、3.47、3.56 mm,说明当桩径增大时,桩沉入软弱夹层过程中对软弱夹层的影响范围变大,离桩相同距离的软弱土层的应力和沉降量随桩径的增大而增大。

参考文献:

- [1] 蔡健,周万清,林奕禧,等.深厚软土超长预应力高强混凝土管桩轴向受力性状的试验研究[J].土木工程学报,2006(10):102-106;116.

(下转第71页)

看, 国内智慧城市的研究热点主要包括大数据、城市治理、物联网等, 国外研究热点主要包括 smart city、internet、big data 等。某种程度上表明国内外关于智慧城市关键词具有一定的相关性。无论是国内还是国外, 关键词都根据时代发展趋势来演进, 在早期关于智慧城市发展, 都与互联网相关, 随着时代发展, 智慧城市的关键词逐渐演进与数字化、公共服务等相关。在一定程度上说明智慧城市未来发展趋势与民生服务挂钩。

(4) 从未来发展趋势来看, 需注重数据、信息技术、人工智能的发展, 以及促进城市产业创新和方式转型, 引领城市经济和生产方式向网络化、数字化、智能化发展, 未来还需重视智慧城市的建设与民生的关系, 提高城市的服务效率和居民的生活质量。

参考文献:

- [1] 王凯宸. 智慧城市多源物联网数据人工智能分析平台的设计[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(13): 39-41.
- [2] 何辉. 大数据时代的城乡规划与智慧城市研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(13): 1-3.
- [3] 戚文来, 韩娟. 智慧城市时空大数据平台下自然资源档案管理系统的升级与改造[J]. 测绘通报, 2020(11): 155-157; 166.
- [4] RIVADENEIRA J E, SÁNCHEZ O T, DIAS M, et al. CONFLUENCE: An integration model for human-in-the-loop iot privacy-preserving solutions toward sustainability in a smart city[J]. Ieee Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 8690-8714.
- [5] 刘芸, 李政. 智慧城市提升城市治理能力[J]. 四川建筑, 2019, 39(4): 10-13.
- [6] 王大鹏. 物联网技术及灾害信息分析系统[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 33-36.
- [7] 安达, 梁智昊, 许守任. 基于大数据的智慧城市安全建设研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(3): 229-232.
- [8] 甄峰, 秦萧. 大数据在智慧城市研究与规划中的应用[J]. 国际城市规划, 2014, 29(6): 44-50.
- [9] 杨峰, 胡秋涵, 任运月. 智慧化城市治理: 驱动、挑战与进路[J]. 成都大学学报(社会科学版), 2022(4): 26-35.
- [10] 张小娟, 贾海薇, 张振刚. 智慧城市背景下城市治理的创新发展模式研究[J]. 中国科技论坛, 2017(10): 105-111.
- [11] 桑懿, 高天, 罗文清, 等. 物联网技术在智慧城市建设中的应用研究[J]. 中国住宅设施, 2021(8): 7-8.
- [12] FERLIN E P, REZENDE D A. Big data applied to strategic digital city: study on the volume of data in the smart city applications [J]. Revista Gestao&Tecnologia-Journal of Management and Technology, 2019, 19(2): 175-194.

(上接第 59 页)

- [2] 肖景文, 魏红卫, 赵凡, 等. 场地软弱夹层发育方向对桩承桥台地震反应的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12): 3219-3227.
- [3] 戴轩, 郑刚, 张楠, 等. 成层软土地区高层建筑 PHC 管桩抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 248-256.
- [4] 凌造, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 非挤土嵌岩预应力高强度混凝土管桩的桩端承载性能研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 97-107.
- [5] 刘怡林, 宁兆轲, 姜瑞清, 等. 抗滑桩加固含软弱夹层边坡三维弹塑性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 216-221.
- [6] 庄一舟, 黄福云, 钱海敏, 等. PHC 管桩-土相互作用受力性能拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 42-51; 71.
- [7] 乔赵阳, 陶桂兰, 潘跃鹏. 考虑桩-土作用的 PHC 管桩极限变形及其影响因素分析[J]. 水运工程, 2018(7): 165-171.