文章编号:1674-2974(2026)03-0088-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026027

# 螺纹结构对螺纹桩双桩竖向承载特性的影响研究

徐丽娜†,张鹏 ,孙爽
(吉林建筑大学 交通科学与工程学院,吉林 长春 130118)

**摘 要**:基于三维有限元数值模拟分析,建立了竖向荷载下双桩的数值分析模型,研究了不同设计参数(包括桩间距、螺牙高度、螺纹段长度)对螺纹桩双桩竖向承载特性的影响,分析了桩周土体位移云图的变化规律,揭示了桩身轴力传递特性,并结合承载力提升效果与材料利用率探究了螺纹结构的最佳设计区间.结果表明:随着桩间距的增加,桩间的相互干扰效应减小,双桩承载力随之增加,桩间距为4~5倍桩外径时双桩承载性能较好;增加螺牙高度会加强螺纹与土的机械咬合作用,进而提升双桩承载力,螺牙高度与桩内径的比值为0.5~0.6时双桩承载能力得到充分发挥;增加螺纹段长度能够有效增加桩-土体的接触面积,桩的侧摩阻力增强,从而提升双桩承载力与桩身材料利用率,螺纹段长度与桩长比值为0.6~0.7时的双桩承载性能最佳;提高螺纹段长度是提高双桩承载力最有效的途径.

**关键词**:螺纹桩双桩;螺纹结构设计;承载力;材料利用率;数值模拟
**中图分类号**:TU473.1 **文献标志码**:A

# Study on influence of threaded-structure on vertical bearing characteristics of double piles of threaded piles

XU Lina†,ZHANG Peng,SUN Shuang
(School of Transportation Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

**Abstract**: Based on three-dimensional finite element numerical simulation analysis, a numerical analysis model of double piles under vertical load was established, and the influence of different design parameters (including pile spacing, thread height, and thread length) on the vertical bearing characteristics of double piles of threaded piles was investigated. Meanwhile, the change rule of the soil displacement nephogram around the pile was analyzed, and the axial force transfer characteristics of the pile shaft were revealed and combined with the effect of bearing capacity and pile utilization rate of pile body material in order to explore the optimal design interval of the threaded structure. The results show that: with the increase of pile spacing, the mutual interference effect between piles is reduced, the load-bearing capacity of double piles is increased, and the load-bearing performance of double piles is better when the pile spacing is 4~5 times the pile outer diameter. Increasing thread height can strengthen the mechanical occlusion of the threads with the soil, which in turn enhances the bearing capacity of the double piles. In addition, the double-pile bearing capacity with the ratio of the thread height to the inner diameter of the pile of 0.5~

* **收稿日期**:2025-02-18
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(52008185), National Natural Science Foundation of China(52008185)
**作者简介**:徐丽娜(1986—),女,吉林通化人,吉林建筑大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: xulina@jlju.edu.cn

0.6 is fully utilized. Increasing the thread length can effectively increase the contact area of the pile-soil body, thereby enhancing the lateral frictional resistance of the pile and improving the double-pile bearing capacity and the utilization rate of pile material. The optimal double-pile bearing performance was also obtained with a thread length to pile length ratio of 0.6~0.7. The most efficacious method of enhancing the bearing capacity of double piles is to increase the thread length.

**Key words**: double piles of threaded piles; threaded structure design; bearing capacity; material utilization rate; numerical simulation

螺纹桩是一种常用的桩基础形式,凭借其较高的桩侧摩阻力和端承力,被广泛应用于各类基础工程[1-2],双桩结构也广泛应用于海洋风电平台、海上桥梁以及地震带上的建筑或桥梁等工程领域[3-4],合理的双桩设计不仅可以提高结构基础的承载能力和稳定性,还可以提高工程的经济效益和提升施工效率.

对于双桩来说,桩间距、螺牙高度、螺纹段长度、承台厚度等参数对双桩的承载特性都会产生影响[5-8]. 王国才等[9]采用数值分析软件探讨螺纹群桩的承载机理,发现螺纹桩的承载力随距径比(即桩间距与桩外径的比值)的增加而增大,当距径比为4~5时增幅最明显. 马淼等[10]通过小比例半截面桩的试验方法,研究桩间距对双桩基础抗拔承载性能的影响,发现双桩的破坏过程与单桩基本相同,且桩间距越大,承载力越高. 冷伍明等[11]通过模型试验和数值模拟,研究螺纹桩桩身轴力及桩侧摩阻力分布规律,发现螺纹桩桩侧承载力主要源于桩周土体的剪切作用,且存在最优螺距使桩周土体抗剪强度充分发挥,进而实现承载力最大化. Ma等[12]研究了螺纹桩破坏机理及桩土接触的关系,分析了螺纹周围土体应力变化规律及土体破坏模式,发现螺纹剪切板的承载力明显高于平面剪切板,而螺纹桩的承载力随着螺旋间距的增加先增大后减小. 陈亚东等[13-14]对竖向荷载作用下螺杆桩的承载特性及桩周土体变形规律开展研究,发现荷载-沉降曲线呈缓降型,螺杆桩整体承载力较等直径单桩提高近30%. Yang等[15]结合室内试验与数值模拟,分析了不同条件下螺纹桩的承载能力、沉降特性和受力特性,发现螺纹桩侧阻力初期随螺纹段长度的增加而增大. 李成巍等[16]通过模型试验和数值模拟发现,影响螺纹桩承载力的主要参数是螺纹间距和螺纹宽度,而不是螺纹厚度. 于航等[17]采用可视化小比例半截面桩试验方法分析了盘悬挑径对双桩承载性能的影响,得到在桩间距为7倍桩径,盘悬挑径为桩径的1.5~1.75倍时,双桩承载性能较好. 孙琳等[18]通过试验研究得到,双桩扩径位置上方桩长应大于4倍悬挑径,且扩径位置要尽量相同,扩径位置越靠近桩端时,承载力越强. 徐丽娜等[19-23]采用数字图像相关技术分别监测挤扩桩和螺纹桩桩周土体移动变化过程,分析了桩身结构参数对单桩承载力、位移分布规律以及桩周土体破坏情况等的影响.

为了深入探究螺纹桩参数对双桩竖向承载特性的影响,通过数值模拟方法,分析螺纹桩参数(包括桩间距$S$、螺牙高度$h$、螺纹段长度$H$等)对双桩承载力的影响,并对双桩的承载力提升率与材料利用率进行分析.

## 1　单桩模型验证

缩尺模型桩试验可用于研究异形桩承载力变化规律,为实际工程应用提供参考[24-27]. 本文采用螺纹桩单桩等比例缩小模型进行试验研究与数值模拟分析,通过比对分析,验证数值分析模型的准确性,为螺纹桩双桩(简称双桩)承载特性及影响因素的模拟分析提供基础.

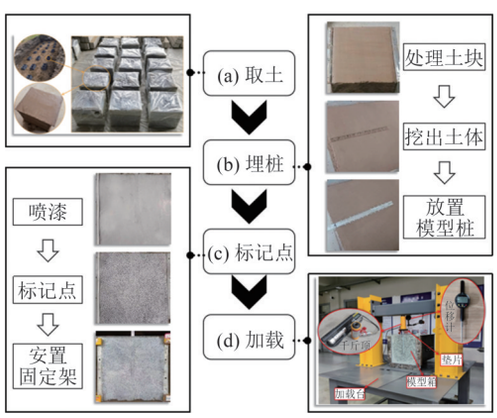
模型试验用土取自中国长春市某工地的建筑基坑,试验用土呈黄褐色,为低液限黏土,基本物理性质参数如表1所示,具体取土过程见文献[23].

**表1　试验用土的基本物理性质参数**

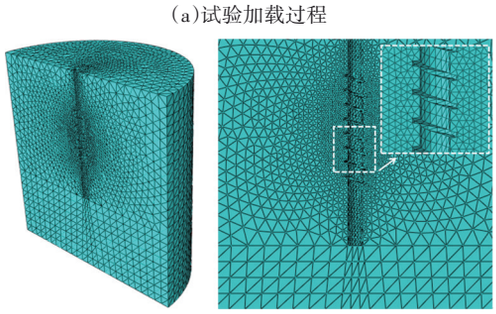
**Tab.1　Basic physical property parameters of the soil used for the test**

| 参数 | 密度/(g·cm$^{-3}$) | 含水率/% | 液限/% | 塑限/% | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 取值 | 1.9 | 28.157 | 38.863 | 22.875 | 14.5 | 30 |

试验所用模型桩为等比例缩小的钢制半面桩，模型桩内径 $d$=16 mm，桩长 $L$=250 mm，螺纹间距 $t$=15 mm. 试验加载过程如图1(a)所示，模型试验的竖向荷载采用手动千斤顶进行施压，加载方式采用慢速控制荷载法，桩体下降采用数显位移计测量，按照沉降控制法记录荷载，桩身每下沉0.2 mm记录一次荷载数据和DIC设备采集照片的编号，直至桩身下沉10 mm，结束试验[23]，数值模拟网格划分见图1(b).




(a)试验加载过程



(b)桩周土模型网格划分

图1 室内模型试验与数值模拟

Fig.1 Indoor model test and numerical simulation

为了验证数值模拟分析的合理性与准确性，利用Abaqus软件建立了与室内模型试验一致的三维有限元模型，模拟了螺纹桩单桩桩顶荷载与沉降的关系.根据前期课题组室内试验结果[19]及文献[28-29]的研究结果，数值模拟中桩体使用线弹性模型，土体采用Mohr-Coulomb理想弹塑性本构模型，材料参数与前期课题组完成的室内模型试验[19]参数一致，如表2所示. 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)[30]和文献[31]，初步确定桩-土界面摩擦系数为0.26.

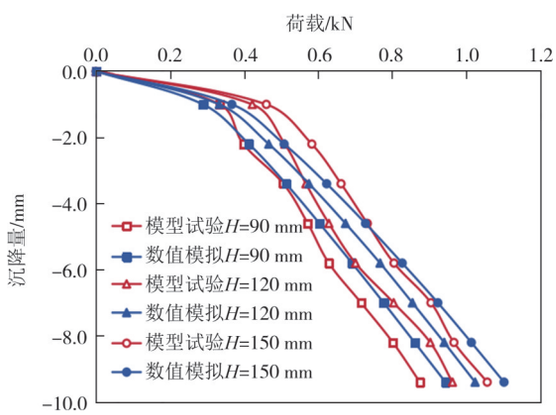
采用四面体网格对模型进行划分，特别对桩-土接触区域的网格划分进行了加密处理，并通过网格敏感性分析以确保结果不受网格大小的影响，如图1(b)所示.

表2 材料属性及相关参数

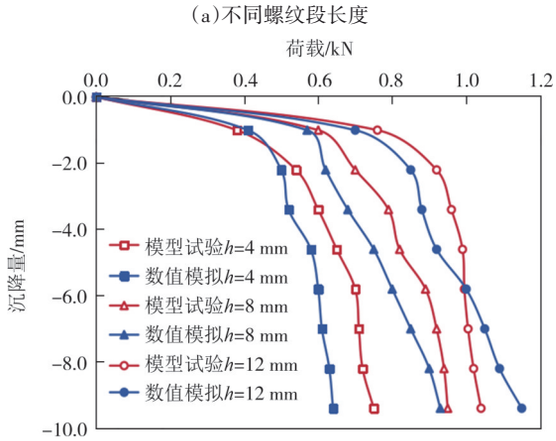
Tab.2 Material properties and related parameters

| 参数 | 螺纹桩 | 土体 |
|---|---|---|
| 杨氏模量/MPa | 25 000 | 46 |
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 2 500 | 1 900 |
| 泊松比 | 0.2 | 0.3 |
| 内摩擦角/(°) | — | 14.5 |
| 黏聚力/kPa | — | 30 |

图2为不同螺纹参数(螺纹段长度 $H$、螺牙高度 $h$)下数值模拟与模型试验结果对比，可以看出，数值模拟和模型试验得到的螺纹桩单桩荷载-沉降曲线变化趋势一致，表明建立模型的方法正确，模型可靠.




(a)不同螺纹段长度




(b)不同螺牙高度

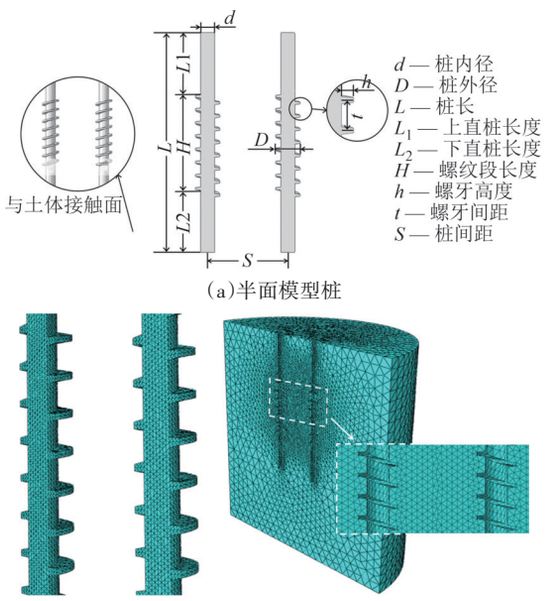
图2 螺纹单桩试验模型与数值模拟的荷载-沉降曲线

Fig.2 Load-settlement curves for single-pile of threaded pile test models and numerical simulations

## 2 双桩模型建立与参数选取

利用Abaqus软件建立螺纹桩双桩三维有限元模型[9,11,14-15]，模拟不同螺纹桩参数在竖向荷载作用下的承载特性，模拟桩尺寸参数与室内模型试验中

的模型桩一致,内径 $d$=16 mm,桩长 $L$=250 mm,螺纹间距为 $t$=15 mm. 模拟桩与土体模型均为三维实体模型,如图 3(a)所示,采用四面体网格对模型进行划分,如图 3(b)所示,材料参数见表 2.




(a)半面模型桩

(b)网格划分

图 3　模型桩与土体模型示意图

Fig.3　Schematic diagram of model pile and soil model

## 3　数值模拟分析

### 3.1　桩–土摩擦系数的影响

为探究摩擦系数对双桩承载力的影响,在保持其他参数相同的前提下,设置摩擦系数范围为 0.15~0.35 进行参数分析,螺牙高度 $h$=6 mm,桩间距 $S$=80 mm. 取桩身下沉 1 mm 时的桩身荷载进行分析,如图 4 所示. 结果表明,当摩擦系数从 0.15 增至 0.20 时,双桩承载力提升 9.63%;摩擦系数从 0.20 增至 0.25 时,双桩承载力提升 7.40%;摩擦系数从 0.25 增至 0.30 时,双桩承载力提升 2.58%;继续增至 0.35 时,承载力仅增加 0.84%.

由此可得,双桩承载力随桩–土摩擦系数的增大而提高,但提升速率逐渐降低. 可见,摩擦系数在 0.2~0.3 区间内对结果影响显著,本文选取处于该敏感区间的中间值 0.26,能合理反映桩土相互作用.

### 3.2　桩间距的影响

为了研究桩间距 $S$ 对双桩竖向承载能力的影响,设计 6 组不同的桩间距(范围为 1~6 倍桩外径),螺纹段长度 $H$=120 mm,上直桩长度 $L_1$=65 mm,螺牙

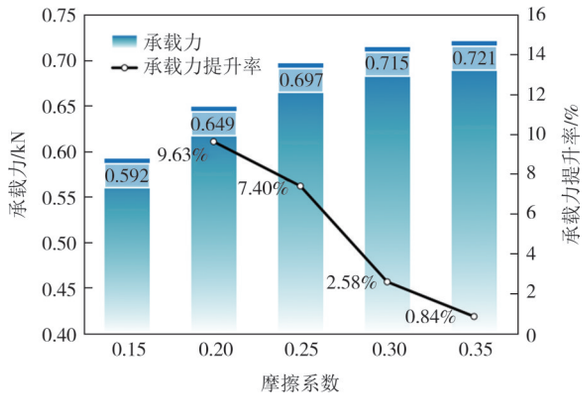



图 4　不同桩–土摩擦系数的桩承载力

Fig.4　Pile bearing capacity with different friction coefficients

高度 $h$=6 mm,桩间距 $S$ 分别为 28、56、84、112、140 和 168 mm,对应的模型桩编号分别为 S1、S2、S3、S4、S5 和 S6,其他数值模拟材料属性及相关参数不变.

#### 3.2.1　荷载–沉降曲线分析

图 5 为不同桩间距 $S$ 下双桩荷载–沉降曲线. 由图 5 可知,在桩身下沉 1 mm 时,双桩 S1~S6 对应的承载力分别为 0.535、0.660、0.697、0.715、0.719 和 0.723 kN,单桩 S0 的承载力为 0.310 kN. 双桩在相同沉降量下具备更高的承载力,且随双桩桩间距 $S$ 的增大,承载力也相应地提升.

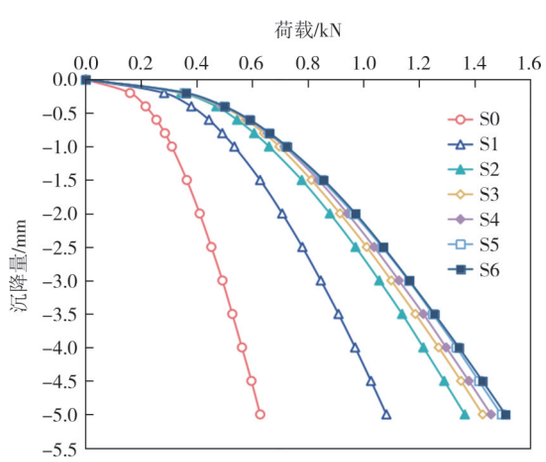



图 5　荷载–沉降曲线与桩间距的关系

Fig.5　Load–settlement curves versus pile spacing

与单桩 S0 相比,在桩身下沉 1 mm 时,双桩的承载力分别提升了 72.6%、112.9%、124.8%、130.6%、131.9% 和 133.2%. 由此可知,随着桩间距的增加,双桩承载力的提升率逐渐减小. 初期当桩间距 $S$ 从 28 mm 增至 56 mm 时,桩的承载力提升率较大,为 23.36%. 但随着 $S$ 继续增加,提升率呈现递减趋势. 当 $S$ 由 56 mm 增加至 84 mm 时,提升率下降至 5.60%;$S$ 由 84 mm 增至 112 mm 时,提升率进一步降低为 2.58%;$S$ 从

112 mm增至140 mm和140 mm增至168 mm时,提升率均为0.56%. 结果表明,当桩间距$S$较小时,双桩间产生较强的干扰效应,桩侧摩阻力的发挥受到了影响,双桩承载力未得到充分发挥.桩间距$S$的增加会显著削弱桩间相互作用,双桩承载力的提升率逐渐平稳.最终,桩间距$S$增加对承载力的提升效应逐渐减弱,如图6所示.综上,桩间距$S$为112~140 mm[即桩间距与螺纹桩外径比值(距径比)为4~5]时最为适宜.

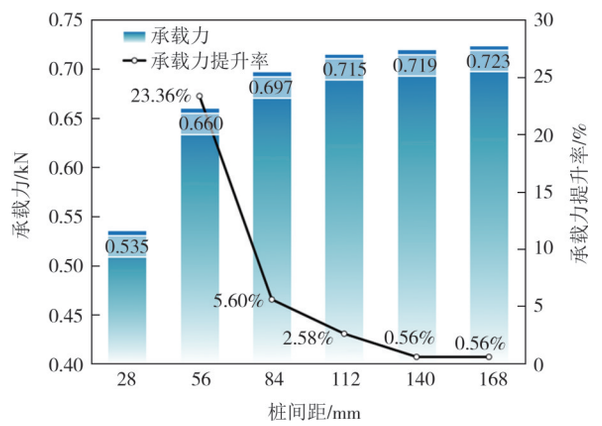



图6 不同桩间距的双桩承载力

Fig.6 Bearing capacity of double piles with different pile spacings

### 3.2.2 附加沉降分析

图7为不同荷载下桩顶沉降随桩间距的变化曲线.由图7可知,双桩结构可以明显降低桩顶沉降.随着桩间距的增加,桩顶沉降呈减小趋势.

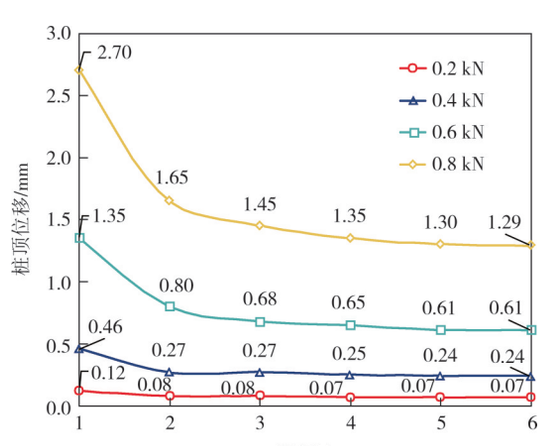



图7 桩顶沉降量与桩间距的关系

Fig.7 Relationship between settlement at the top of pile and pile spacing

当荷载为0.8 kN时,由S1至S2,桩体附加沉降量为1.05 mm;由S2至S3,桩体附加沉降量为0.2 mm;由S3至S4,桩体附加沉降量为0.1 mm;由S4至S5,桩体附加沉降量为0.05 mm;由S5至S6,桩体附加沉降量为0.01 mm. 由此可知,随着$S$增大,双桩的附加沉降量逐渐减小,当桩间距为5~6倍桩外径时,桩顶沉降趋于平稳.

因此,在实际工程中,若以沉降控制为主,可采用距径比大于5的桩间距;若以提升承载力优先,则桩间距$S$可取4~5倍桩外径.

### 3.2.3 桩身轴力传递特性分析

图8为不同桩间距$S$下双桩桩身轴力分布曲线(桩体沉降量为5 mm). 从图中可以看出,桩身轴力随与桩顶中心距离的增加而逐渐减小,呈“桩顶大,桩底小”的变化趋势. 这表明双桩的顶部承受的轴力大于底部[24],这种轴力分布随与顶桩中心距离的增加而变化. 随着$S$增大,相同埋置深度处的桩身轴力也相应增加. 这表明$S$增加引发桩身轴力增大,双桩的承载力得到显著提升.

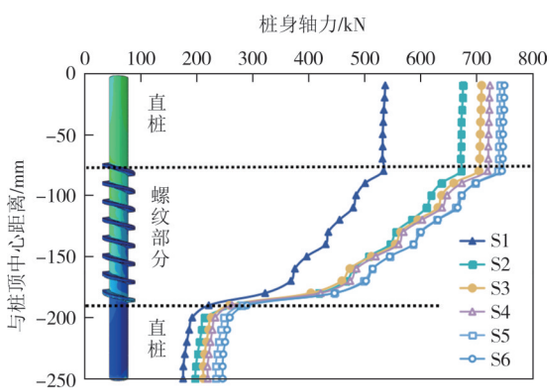



图8 桩身轴力与桩间距的关系

Fig.8 Relationship between pile axial force and pile spacing

当桩体沉降量较小时,桩与土体之间的相互作用主要表现为弹性变形,此时桩基的轴力传递较为均匀. 随着荷载进一步增大,桩基的轴力逐渐由桩端土体承载.

此外,双桩的轴力分布分析发现,与直桩段相比,螺纹段的轴力变化较大. 这是因为螺纹结构显著增强了桩体与桩周土体间的咬合作用,这种咬合作用减少了桩土相对位移,从而提高了桩承载力.

### 3.2.4 桩周土体位移分析

图9为不同桩间距$S$下双桩桩周土体位移云图(桩体沉降量为6 mm).

由图9(a)(b)所示的模拟桩间距分别为1倍、2倍桩外径. 双桩桩身沉降的过程,螺纹对桩周土体产生压力,使桩周土体产生错位滑移,在土体中产生一定范围的位移场. 两组模拟中,双桩荷载作用下桩周

土体产生的位移场均存在重叠区域,表明该区域土体同时承受双桩螺纹段施加的压力,进而导致该区域土体的剪应力率先达到其抗剪强度限值,最终丧失承载能力.

图 9(c)模拟的桩间距为 3 倍桩外径. 从位移云图可以看出,双桩桩周土体的主要位移场重合范围较小,此时双桩基础的承载力明显提升,双桩效应逐渐减弱.

图 9(d)~(f)三组模拟桩间距分别为 4 倍、5 倍和 6 倍桩外径. 随着桩间距增加,双桩螺纹部分对土体施加压力而产生的位移场完全分离,双桩基础承载力的提升幅度也趋于平缓.

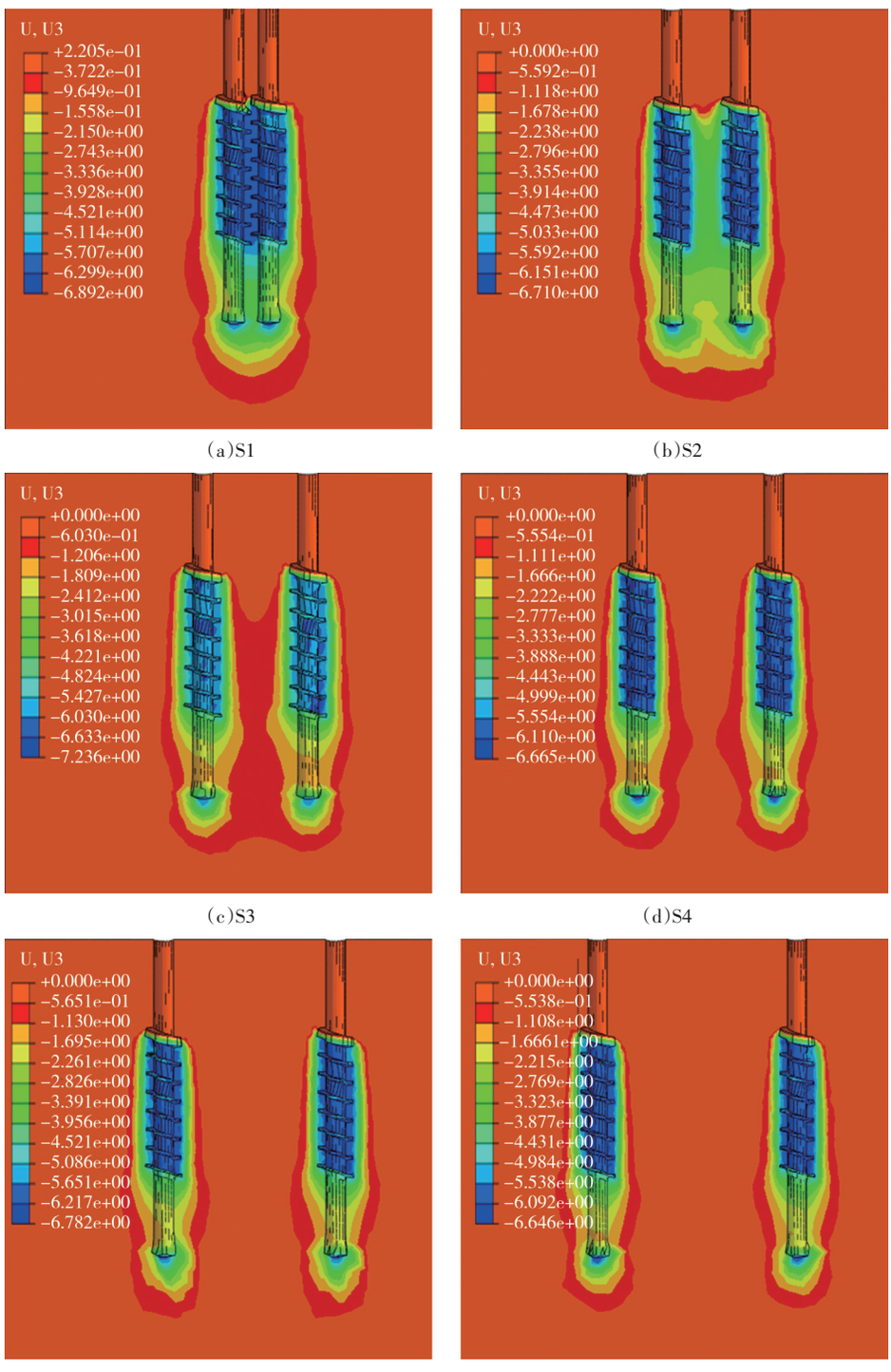



图 9　不同桩间距的桩周土体位移云图

Fig.9　Displacement nephogram of soil around piles with different pile spacings

### 3.3 螺牙高度的影响

螺牙高度会影响螺纹与桩周土体的机械咬合作用,进而影响螺纹桩竖向承载力.为分析螺牙高度对双桩的影响,在其他参数相同的前提下,设置6组不同螺牙高度的模型桩.螺纹段长度$H$=120 mm,上直桩长度$L_1$=65 mm,桩间距$S$=80 mm,螺牙高度$h$分别为2、4、6、8、10和12 mm的模型桩对应编号分别为H1、H2、H3、H4、H5和H6.

#### 3.3.1 荷载-沉降曲线分析

图10为不同螺牙高度下双桩荷载-沉降曲线.由图10可知,当桩身下沉1 mm时,双桩H1~H6承载力依次分别为0.526、0.608、0.688、0.753、0.812和0.874 kN,此时双直桩H0的承载力为0.167 kN.增大螺牙高度可增加桩侧土体接触面积,一方面增大桩土界面摩擦力,另一方面增强螺纹与土体的机械咬合作用,双重作用下桩的承载力得以显著提高.

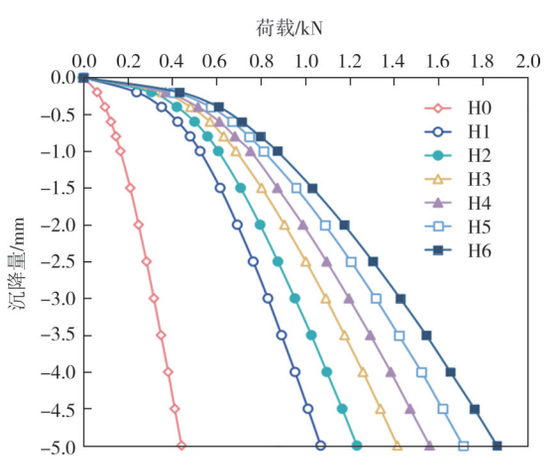



图10 不同螺牙高度的荷载-沉降曲线

Fig.10 Load-settlement curves for different thread heights

与双直桩H0相比,当桩身下沉1 mm时,双桩的承载力分别提升215.0%、264.1%、312.0%、350.9%、386.2%和423.4%.螺牙高度$h$由2 mm增加至4 mm,桩的承载力提升率为15.59%;$h$由4 mm增加至6 mm,桩承载力提升率为13.16%;$h$由6 mm增加至8 mm,桩承载力提升率为9.45%;$h$由8 mm增加至10 mm,桩承载力提升率为7.84%;$h$由10 mm增加至12 mm,桩承载力提升率为7.64%,由此可见,桩的承载力提升率随着螺牙高度增加逐渐减小,如图11所示.

#### 3.3.2 桩身材料利用率的分析

通过计算得到H1~H6的桩身体积分别为52.96、56.22、60.04、64.42、69.38和75.08 cm$^3$,桩身下沉1 mm时H1~H6桩承载力与桩身体积的比值作为桩身材料的利用率[19],依次分别为9.932、10.815、11.459、11.689、11.704和11.641 N/cm$^3$,不同螺牙高度的双桩材料利用率如图12所示.

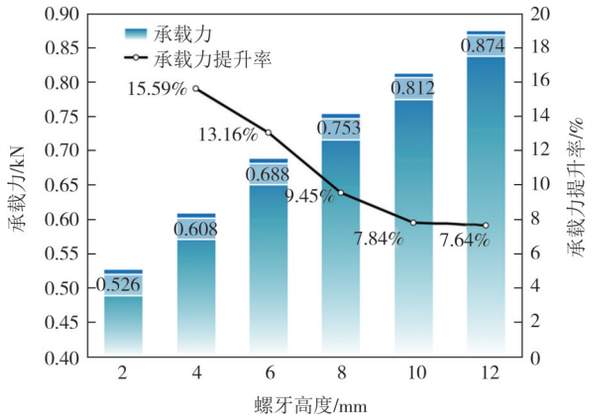



图11 不同螺牙高度的桩承载力

Fig.11 Bearing capacity of piles with different thread heights

由图12可以看出,随着螺牙高度$h$增加,桩身材料体积(主要是螺牙部分)增大,材料利用率先上升后下降,当$h$为8~10 mm时达到峰值.当$h$>8 mm时,螺纹尖端弯曲应力显著增大,引发螺牙塑性变形甚至断裂,塑性变形导致螺牙有效咬合效应减弱,削弱了侧摩阻力提升效果.因此,综合承载力大小、承载力提高率和桩身材料的利用率,本文试验条件下,$h$为8~10 mm(即$h$与桩内径的比值为0.5~0.6)最优.

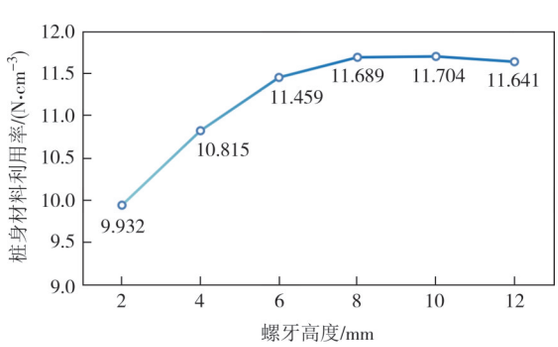



图12 不同螺牙高度的桩身材料利用率

Fig.12 Pile material utilization rate for different thread heights

### 3.4 螺纹段长度的影响

螺纹段增加了桩-土间的接触面积,能够更有效地提高侧摩阻力,进而影响螺纹桩竖向承载能力.为分析螺纹段长度对双桩的影响,在保持其他参数相同的前提下,设置6组不同螺纹段长度的模型桩.螺牙高度$h$=6 mm,桩间距$S$=80 mm,螺纹段长度分别为60、90、120、150、180和210 mm,对应的模型桩编号分别为L1、L2、L3、L4、L5和L6.

### 3.4.1　荷载-沉降曲线分析

图 13 为不同螺纹段长度的双桩荷载-沉降曲线. 由图 13 可知,随着螺纹段长度的增加,荷载-沉降曲线逐渐变缓. 当桩身下沉 1 mm 时,L1~L6 的承载力分别为 0.516、0.601、0.688、0.758、0.826 和 0.898 kN,直桩 L0 的承载力为 0.167 kN.

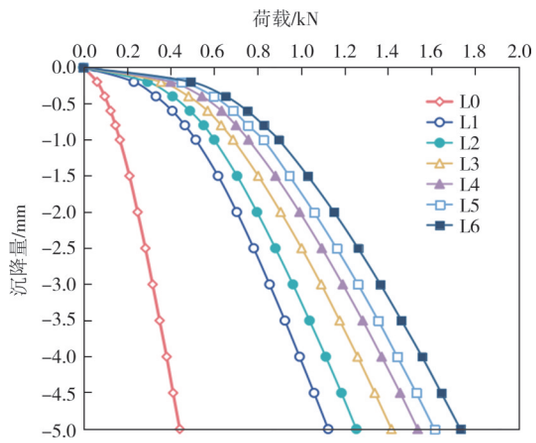



图 13　不同螺纹段长度的荷载-沉降曲线

Fig.13　Load-settlement curves for different thread lengths

与 L0 相比,螺纹桩 L1~L6 承载力分别提升了 209%、260%、312%、354%、395%、438%. 螺纹段长度 $H$ 由 60 mm 增加至 90 mm,承载力提升率为 16.47%;$H$ 由 90 mm 增加至 120 mm,承载力提升率为 14.48%;$H$ 由 120 mm 增加至 150 mm,承载力提升率 10.17%;$H$ 由 150 mm 增加至 180 mm,承载力提升率为 8.97%;$H$ 由 180 mm 增加至 210 mm,承载力提升率为 8.72%. 综上可知,双桩承载力主要取决于桩侧摩阻力,随着 $H$ 增加,桩-土接触面积增大,桩侧摩阻力提高,双桩基础的沉降变形减小,承载力随之提升. 桩的承载力提升率随 $H$ 的增加而逐渐减小,如图 14 所示.

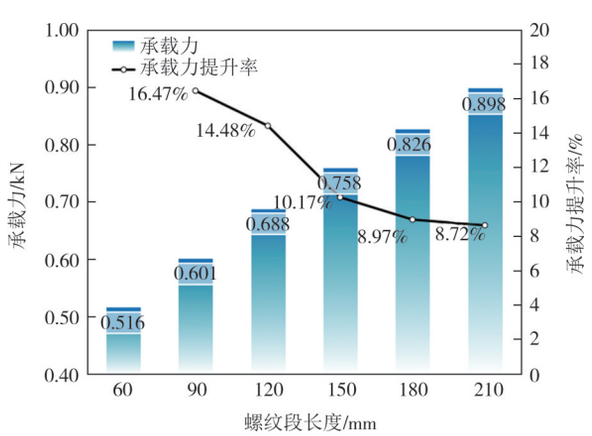



图 14　不同螺纹段长度的桩承载力

Fig.14　Bearing capacity of piles with different thread lengths

### 3.4.2　桩身材料利用率的分析

通过计算得到相应的桩身体积分别为 55.15、57.59、60.04、62.48、64.92 和 67.37 $cm^3$,以桩身下沉 1 mm 时承载力与桩身体积的比值作为桩身材料的利用率,分别为 9.356、10.436、11.459、12.132、12.723 和 13.329 $N/cm^3$,不同螺纹段长度的双桩材料利用率如图 15 所示.

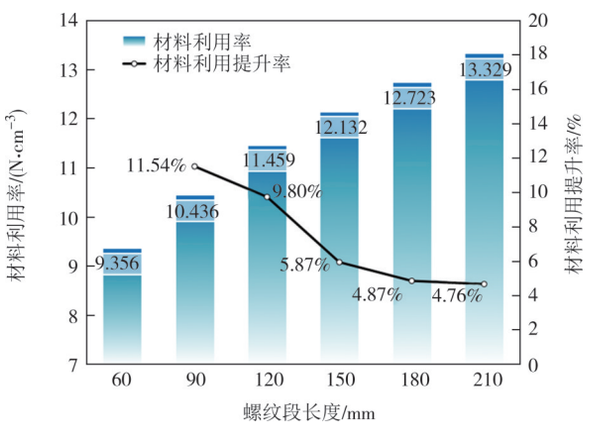



图 15　不同螺纹段长度的桩身材料利用率

Fig.15　Pile material utilization rate for different thread lengths

螺纹段长度 $H$ 由 60 mm 增加至 90 mm,桩身材料利用的提升率为 11.54%;$H$ 由 90 mm 增加至 120 mm,桩身材料利用的提升率为 9.80%;$H$ 由 120 mm 增加至 150 mm,桩身材料利用的提升率为 5.87%;$H$ 由 150 mm 增加至 180 mm,桩身材料利用的提升率为 4.87%;$H$ 由 180 mm 增加至 210 mm,桩身材料利用的提升率为 4.76%. 综上可知,桩身材料利用率的提升率随 $H$ 增加而逐步减小,如图 15 所示.

因此,在螺纹桩设计过程中,螺纹段长度 $H$ 不宜过大,应结合实际工程合理设计,保证螺纹桩承载力满足要求,同时最大幅度节约桩身材料. 综上所述,在本试验条件下,螺纹段长度 $H$ 为 150~180 mm(即 $H/L$=0.6~0.7)时最合理.

## 3.5　双桩设计参数的差异率分析

为进一步观察不同参数对双桩承载力的影响,定义差异率系数[32]为:

$$\eta = \frac{P_{\text{Thread}} - P_{\text{Straight}}}{P_{\text{Straight}}} \times 100\% \tag{1}$$

式中:$\eta$ 为差异率;$P_{\text{Thread}}$ 为双桩承载力;$P_{\text{Straight}}$ 为直桩承载力. 本文取桩间距 $S$、螺牙高度 $h$ 与螺纹段长度 $H$ 作为影响参数,并对各参数的增量幅度进行归一化处理,使各参数的增量幅度位于(0, 1)范围内,归

一化处理公式如下:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

式中:$x_{\max}$与$x_{\min}$分别为$x$的最大值与最小值;$x'$为$x$归一化处理后的结果.

对桩体下沉1 mm时的双桩承载力进行差异率分析,结果如图16所示.差异率从209%提高至438%,说明双桩承载力远高于双直桩.在螺纹段长度和螺牙高度的最大程度处差异率较大,而最大差异率出现在螺纹段长度的最大程度处,此时双桩承载力较双直桩提高了438%,表明在实际应用中双桩设计参数(桩间距$S$、螺牙高度$h$与螺纹段长度$H$)选取时,提高$H$是提高螺纹桩承载力最有效的解决方案,但随$H$增加,桩身材料利用提升率降低,因此在实际工程中应综合考虑选取适当的设计参数.

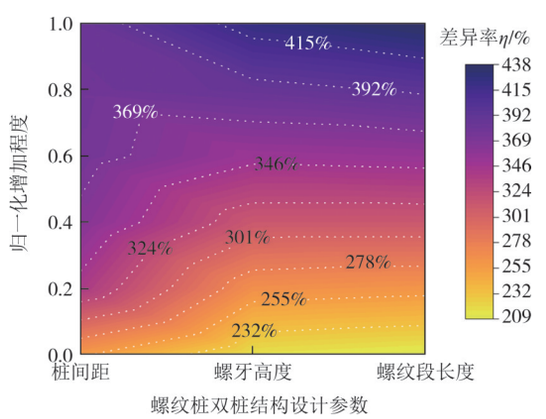



图16 双桩设计参数差异率分布

Fig.16 Distribution of variance rates of design parameters for double-piles

## 4 结论

1)螺纹桩双桩承载力随桩间距$S$增加而增大,但承载力提升率随之降低,桩体沉降量相同时,增加$S$可扩大桩周土体受力范围,减小双桩间的相互作用效应.$S$为112~140 mm(即$S$为4~5倍桩外径)时双桩承载性能最佳.

2)增加螺牙高度$h$可提升双桩承载力,兼顾承载力与材料经济性,$h$为8~10 mm(即$h$与桩内径的比值为0.5~0.6)时最佳.

3)双桩承载力随摩擦系数的增加而提升,但提升幅度逐渐减小,摩擦系数在0.20~0.30范围内对双桩承载力影响较为显著.

4)通过对双桩结构设计参数的差异率分析,提高螺纹段长度$H$是提高双桩承载力最有效的途径,最佳螺纹段长度为150~180 mm(即$H/L$=0.6~0.7).但随$H$增加,桩身材料利用率提升率随之降低.因此,工程中应选取适当的结构设计参数,以兼顾桩体承载力与工程经济性.

## 参考文献

[1] 孙文怀, 张元冬, 魏厚峰, 等. 螺纹桩在软弱地层中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2009,30(3): 74-76.
SUN W H, ZHANG Y D, WEI H F, et al. Application of screw pile in weak strata[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 30(3): 74-76.(in Chinese)

[2] 李红文, 李雪梅, 郑俊杰, 等. 螺纹桩的设计及应用[J]. 土工基础, 2006, 20(2): 82-85.
LI H W, LI X M, ZHENG J J, et al. The design and application of screw pile[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006,20(2): 82-85.(in Chinese)

[3] 王佳佳, 陈效坤, 肖莉丽, 等. 横坡段桥梁双桩双柱式结构受力特征与解析模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024, 55(3): 1092-1106.
WANG J J, CHEN X K, XIAO L L, et al. Mechanics characteristics and analytical model of double-pile and double-column structure of bridge on steep transverse slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(3): 1092-1106.(in Chinese)

[4] 马定乐, 董鹏, 晏长根, 等. 抗滑桩孔开挖对斜坡桥梁双桩基础影响分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(12): 107-114.
MA D L, DONG P, YAN C G, et al. An analysis on influence of anti-slide pile hole excavation on slope bridge double-pile foundation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(12): 107-114.(in Chinese)

[5] 龙涛. 螺纹桩与土相互作用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
LONG T. Study on interaction between threaded pile and soil[D]. Changsha: Central South University, 2010.(in Chinese)

[6] 赵志明. 螺纹桩竖向承载特性及群桩效应研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
ZHAO Z M. Research on vertical bearing characteristics and group pile effect of threaded pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.(in Chinese)

[7] 曹庆志,钱永梅,林超,等. 桩间距对CEP群桩抗压承载性能影响研究[J]. 吉林建筑大学学报,2024,41(2):1-6.
CAO Q Z, QIAN Y M, LIN C, et al. Study on the influence of pile spacing on compressive failure state and bearing performance of group piles of CEP[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2024,

41(2): 1-6.(in Chinese)

[8] 李华强. 桩间距对NT-CEP桩群桩抗拔承载性能影响研究[D]. 长春: 吉林建筑大学,2023.
LI H Q. Study on the influence of pile spacing on the uplift bearing capacity of NT-CEP pile group pile [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2023.(in Chinese)

[9] 王国才,束炜, 赵志明,等. 竖向荷载作用下螺纹群桩承载特性和群桩效应研究[J]. 浙江工业大学学报,2022,50(3): 290-298.
WANG G C, SHU W, ZHAO Z M, et al. Research on load bearing characteristics and pile group effect of screw piles under vertical loads[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(3): 290-298.(in Chinese)

[10] 马淼, 钱永梅, 艾立双, 等. 桩间距对混凝土扩盘桩双桩抗拔承载性能试验研究[J]. 建筑结构,2023,53(增刊1): 2659-2663.
MA M, QIAN Y M, AI L S, et al. Experimental study on effect of pile spacing on pull-out bearing performance of double piles of concrete expanded disk pile[J]. Building Structure, 2023, 53(Sup.1):2659-2663.(in Chinese)

[11] 冷伍明, 魏广帅, 聂如松, 等. 螺纹桩竖向承载特性及承载机理研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(5):1-6.
LENG W M, WEI G S, NIE R S, et al. Research on the vertical bearing characteristics and bearing mechanism of screw pile[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(5): 1-6.(in Chinese)

[12] MA J K, LUO L J, MU T, et al. Experimental study on characteristics of pile-soil interaction in screw piles [J]. Buildings,2022,12(12):2091.

[13] 陈亚东,王安汀,蔡江东,等. 竖向受荷螺杆桩承载变形特性模型试验[J]. 施工技术,2017,46(14):116-119.
CHEN Y D,WANG A T,CAI J D,et al. Experimental on bearing and deformation behavior of half-screw pile under vertical load [J]. Construction Technology, 2017, 46(14): 116-119.(in Chinese)

[14] CHEN Y D,DENG A,WANG A T,et al. Performance of screw - shaft pile in sand:Model test and DEM simulation[J]. Computers and Geotechnics,2018,104:118-130.

[15] YANG T T,ZHENG W C,XIE Y L,et al. Evaluating screw-shaft pile composite foundations in round Gravelly soil:a study using model tests and numerical simulations[J]. Heliyon,2023,9(10): e20887.

[16] 李成巍,陈锦剑,吴琼,等. 灌注螺纹桩承载机理与计算方法[J]. 上海交通大学学报,2010,44(6):726-730.
LI C W, CHEN J J, WU Q, et al. Bearing mechanism and calculation method of screw pile[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2010,44(6): 726-730.(in Chinese)

[17] 于航,钱永梅,牛雷,等. 盘悬挑径对混凝土扩盘桩双桩抗拔承载性能的影响研究[J]. 建筑结构,2023,53(13):147-151.
YU H, QIAN Y M, NIU L, et al. Research on influence of disc cantilever diameter on pull-out bearing capacity of concrete expanded-plate double piles [J]. Building Structure, 2023, 53(13): 147-151.(in Chinese)

[18] 孙琳, 钱永梅, 田伟,等. 扩径位置对CEP抗拔双桩承载性能影响的试验研究[J]. 建筑结构,2023,53(15):147-151.
SUN L, QIAN Y M, TIAN W, et al. Experimental study on influence of expanding position on bearing performance of CEP uplift double pile[J]. Building Structure, 2023, 53(15): 147-151.(in Chinese)

[19] 徐丽娜, 齐晨晖, 郑俊杰,等. 螺牙高度对螺纹桩竖向承载特性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2025,47(1): 36-45.
XU L N, QI C H, ZHENG J J, et al. Influence of screw height on vertical bearing characteristics of threaded pile[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(1): 36-45.(in Chinese)

[20] 徐丽娜,李昊然,钱永梅,等. 多节钻扩混凝土桩扩径体间距对桩周土体位移影响试验研究[J]. 建筑结构,2023,53(23): 144-148.
XU L N, LI H R, QIAN Y M, et al. Experimental study on influence of distance between expanded body of multi-section drilling and expansion concrete pile on soil displacement around pile [J]. Building Structure, 2023, 53(23): 144-148.(in Chinese)

[21] 徐丽娜, 邓皓允, 郑俊杰, 等.扩径体直径对钻扩混凝土桩桩周土体影响的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 222-234.
XU L N,DENG H Y,ZHENG J J,et al. Experimental study on influence of diameter of expanded body on soil around drilled-expanded concrete pile[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2022,49(7): 222-234.(in Chinese)

[22] XU L N,QI C H,NIU L,et al. Effect of expanded body diameter on the soil surrounding a pile based on the half-face pile model test of undisturbed soil[J]. Buildings,2023, 13(4):951.

[23] XU L N, DENG H Y, NIU L, et al. Study on soil displacement fields around the expanded body of drill-expanded concrete piles based on DIC technique[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9097.

[24] 丁选明,李佳,欧强. 螺钉桩竖向承载特性数值模拟研究[J]. 地基处理,2022,4(5):361-371.
DING X M,LI J,OU Q. Numerical simulation research of vertical bearing capacity of screw pile [J]. Journal of Ground Improvement,2022,4(5):361-371.(in Chinese)

[25] 周航,亓戈平, 陈荣淋. 软土中XCC刚性桩复合地基承载特性时效性研究[J]. 中国公路学报,2024,37(6):132-143.
ZHOU H, QI G P, CHEN R L. Study on time effect of bearing

characteristics of XCC rigid pile composite foundation in soft soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 132-143.(in Chinese)

[26] 黄茂松,姚钧天,俞剑,等. 软黏土中含桩地下结构地震响应离心试验模拟[J]. 岩土工程学报,2024,46(增刊1):1-5.
HUANG M S, YAO J T, YU J, et al. Centrifugal mode tests on seismic response of underground structures with pile foundations in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(Sup.1): 1-5.(in Chinese)

[27] 龚晓南,邵佳函,解才,等. 桩端扩大头尺寸对承载性能影响模型试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(11):102-109.
GONG X N, SHAO J H, XIE C, et al. Model test on influence of enlarged head size on bearing capacity of pile end[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 102-109.(in Chinese)

[28] 钟炎,孔纲强,邓华锋,等. 软黏土中注浆位置对螺旋桩竖向承载力的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(11):4944-4958.
ZHONG Y, KONG G Q, DENG H F, et al. Influence of grouting position in soft clay on the vertical bearing capacity of screw piles [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(11): 4944-4958.(in Chinese)

[29] 白晓宇, 张英杰, 吴泽坤, 等. GFRP筋微型抗拔桩承载性能与荷载传递机制[J]. 岩石力学与工程学报,2025,44(6):1624-1635.
BAI X Y, ZHANG Y J, WU Z K, et al. The bearing capacity and load transfer mechanism of GFRP bar micro uplift pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(6): 1624-1635.(in Chinese)

[30] 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.(in Chinese)

[31] 竺明星,王洋,龚维明,等. 基于桩-土界面脱开效应及摩阻力增强效应影响的水平荷载作用下桩受力机理研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(4):117-130.
ZHU M X, WANG Y, GONG W M, et al. Bearing mechanism of laterally loaded piles under separation effect and friction enhancement effect of pile-soil interface[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 117-130.(in Chinese)

[32] LI T, XU P, YANG G Q. Investigation into bearing performance of concrete expanded-plates piles: field test and numerical modelling[J]. Engineering Structures, 2022, 271: 114954.