文章编号:1674-2974(2025)09-0103-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025091

螺槽单桩竖向承载影响参数分析

邓友生[1,3],肇慧玲[1,3†],赵明华[2],刘晓明[2],姚志刚[1,3],庄子颖[1,3]
(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;
2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
3. 西安科技大学 桩承结构研究中心,陕西 西安 710054)

摘 要:螺槽桩是一种经济低碳的新型预制桩,通过桩侧特殊螺槽结构改善桩体承载性能.通过模型试验与有限元计算,分析螺槽桩与等截面桩荷载传递特性差异,引入材料利用率概念,探讨不同螺槽参数下桩体承载特性.结果表明:螺槽桩竖向沉降曲线呈缓变趋势,其极限承载力为等截面桩的1.85倍,材料利用率为等截面桩的2.85倍;螺旋形槽体构造增大了桩-土接触面积,提升了侧阻力,螺槽端与桩端形成多点端阻承载模式增强端承力;增加螺槽内径桩体承载能力(提升了337.2%),然而材料利用率比下降了133.8%;存在最优螺槽间距使得材料高效利用,螺槽厚度与内径比大于1时会导致材料利用率降低;增大螺槽宽度可显著提升螺槽桩承载能力,但会导致材料利用率出现先增后减的趋势.

关键词:岩土工程;桩基础;参数分析;承载力;模型试验
中图分类号:TU473.1 **文献标志码**:A

Influence Parameter Analysis of Vertical Bearing Capacity for Single Screw Groove Pile

DENG Yousheng[1,3],ZHAO Huiling[1,3†],ZHAO Minghua[2],LIU Xiaoming[2],
YAO Zhigang[1,3],ZHUANG Ziying[1,3]
(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Pile-supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Screw groove piles, a new type of precast pile, are economically and environmentally friendly, and they can improve the load-bearing performance of the pile through a unique screw groove structure. Through model tests and finite element calculation, the difference in load transfer characteristics between screw groove piles and equal section piles is analyzed, and the concept of material utilization is introduced to explore the bearing characteristics of piles with different screw groove parameters. The results demonstrate that the vertical settlement curve of the screw groove pile exhibits a gradual trend, with an ultimate bearing capacity 1.85 times higher than that of the equal section pile, and its material utilization rate is 2.85 times higher. The screw groove structure increases

* **收稿日期**:2024-09-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878554),National Natural Science Foundation of China(51878554);陕西省自然科学基础研究计划重点项目(2018JZ5012),Key Projects of Shaanxi Natural Science Basic Research Plan(2018JZ5012)
作者简介:邓友生(1969—),男,湖南桂阳人,西安科技大学教授,博士
† 通信联系人, E-mail:zgbxzhl@163.com

the pile-soil interaction surface, thereby increasing the skin friction resistance of the pile. The screw groove surface end resistance and pile tip resistance form a multipoint vertical bearing mode. Increasing the inner diameter of the screw groove piles increases the load-carrying capacity by 337.2%, but the material utilization ratio is decreased by 133.8%. The existence of optimal screw groove spacing enables efficient material utilization, while a groove thickness-to-inner diameter ratio greater than 1 leads to reduced resource utilization efficiency. The bearing capacity of screw piles can increase significantly with the increase of screw groove width; however, their material utilization initially increases and then decreases.

Key words: geotechnical engineering; pile foundation; parametric analysis; bearing capacity; model test

随着各类工程项目建设,复杂地质条件以及建筑物结构对工程桩承载力提出了越来越高的要求[1-3]. 目前,工程建设中主要采用钻孔灌注桩或预制混凝土桩. 然而,钻孔灌注桩质量控制困难、产生泥浆污染、消耗大量资源等问题尤为突出,不符合可持续发展理念. 相比之下,预制桩因施工简单可靠、材料性能发挥充分、工业集约化程度高等优势,更契合当前国家绿色工业化发展的需求[4-6].

传统桩体材料用量大,为节约资源,桩基优化选型已引起国内外学者的广泛关注. 异形桩是在传统桩基上发展起来的新桩型[7-9],可发挥地基土体和桩体本身的潜在能力,符合现代桩基绿色发展的需求[10-12]. 异形桩主要通过增加端承力和侧摩阻力进行承载能力的提升,王新泉等[13]通过试验表明,Y形桩极限承载力是圆桩的1.6倍,桩侧表面积为圆桩的1.56倍. 周航等[14]利用室内模型试验对比分析了X形混凝土桩与圆桩承载性能,表明X形桩会在同等条件下承担更多荷载. 周佳锦等[15]根据现场静钻根植预制桩试验,表明其施工效率相比同直径钻孔灌注桩提高了3倍以上. Chen等[16]提出了H形截面和矩形截面组成的复合阶梯桩,结果表明,这种复合桩可以缩短桩长,节约材料. 邓友生等[17]和Li等[18]通过粒子图像测速技术表明梅花桩的桩端阻力、桩侧摩阻力和沉降分别为圆桩的1.00倍、1.38倍和1.12倍. 为进一步节省材料用量,本文提出一种新型预制混凝土螺槽桩,以期螺槽结构在荷载传递过程中结合桩侧阻力和桩端阻力两方面叠加提升桩体承载能力,充分利用土体自身的抗剪强度,大幅提升资源利用效率,为现代化预制桩设计提供一种新的可能.

为研究螺槽桩受力机理及螺槽参数对其承载特征的影响,通过模型试验与数值计算方法,对比分析等截面桩与螺槽桩在竖向受荷过程中材料利用率及荷载传递机理的差异. 从材料利用率与承载力两方面分析螺槽内径、螺槽间距、螺槽厚度和螺槽宽度对桩体的影响,以期为螺槽桩设计与应用提供一定的理论参考.

1 模型试验与数值计算

1.1 物理模型试验

试验采用的模型箱(图1)长4.0 m,宽2.0 m,高2.0 m. 模型桩与模型箱侧壁距离大于10倍桩径,可忽略边界效应[19].

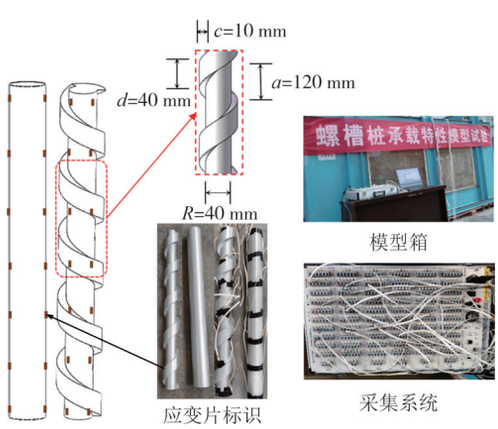


图1 物理模型试验系统

Fig.1 Physical model test system for piles

为探明桩型对桩体竖向承载规律的影响,分别设计了螺槽桩与等截面桩. 桩体材料采用铝材,在试验过程中能够产生满足测试要求的应变[20-21],其易于加工的优势也适用于缩尺模型试验,材料的密度为2.70 g/cm^3,弹性模量为7.2×10^4 MPa. 模型试验基于相似比原理,综合考虑模型试验可行性与有效性,设定试验几何相似比为1∶10,物理量相似常数由Buckingham π定理[22]导出,如表1所示. 试验螺槽桩桩长为600 mm,内径为40 mm,外径为60 mm,螺槽宽度为10 mm,螺槽厚度为40 mm,螺槽间距为

120 mm;等截面桩桩长为600 mm,直径为60 mm. 试验土体取自西安市临潼区某工地,分级配筛分后,黄土密度为1.81 g/cm^3,黏聚力为13.30 kPa,内摩擦角为23.4°. 当基础直径B与土体特征粒径d_{50}比值大于30(B/d_{50}>30)时,可以忽略土颗粒不缩小带来的误差影响[23],本次模型试验选用螺槽内直径为40 mm,黄土的粒径通常不超过1 mm,因此本次试验土体满足设计要求. 模型箱底面为硬土质底面,模拟桩的持力层. 桩体采用预埋方式置于地基中,黄土按照每层15 cm逐层均匀铺设后夯实平整,当距桩底15、30、45、60 cm时分别用环刀取样,控制土体压实度在0.8以上,以保证土体夯实程度一致. 桩体埋置完成后放置48 h,土体变形稳定后进行加载试验.

表1　模型试验相似比

Tab.1　Model similarity ratio

参数	相似关系	相似比
长度	C_l	1∶10
位移	$C_u = C_l$	1∶10
泊松比	C_v	1∶1
弹性模量	C_E	1∶1
应变	$C_\varepsilon = 1$	1∶1
应力	$C_\sigma = C_E C_\varepsilon = 1$	1∶1
荷载	$C_F = C_E C_l^2 = 100$	1∶100

模型试验加载装置由静力加载系统、监测设备和模型箱组成. 通过模型箱上部反力架、千斤顶、加载板组成的加载系统对桩体施加静力,监测设备为应变片、位移计和数据采集装置. 采用慢速维持荷载法进行分级加载,加载标准参考《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)[24],采用位移计测量桩顶沉降量,两次沉降不超过0.01 mm/30 min时,即可进行下一级加载,加载情况如表2所示. 螺槽桩与等截面桩对称粘贴7组间隔均匀的应变片,监测分级荷载下沿埋深方向桩身应变,为避免埋设及加载中应变片和采集接线破坏,采用绝缘胶带进行保护.

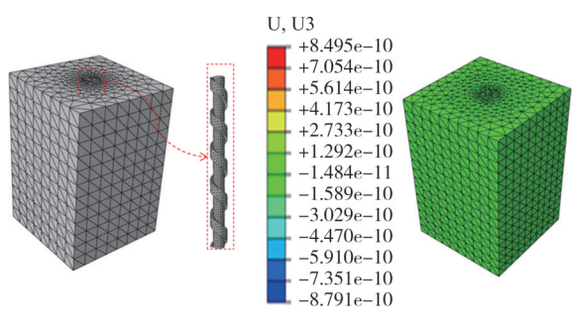
表2　分级加载

Tab.2　Graded loading

加载桩型	荷载值/kN					
	1级	2级	3级	4级	5级	6级
等截面桩	0.42	0.84	1.27	1.69	2.11	2.54
螺槽桩	0.89	1.78	2.67	3.56	4.45	5.34

1.2　数值计算模型

利用ABAQUS有限元软件建立与试验尺寸相同(螺槽桩的桩长为600 mm,内径为40 mm,外径为60 mm,螺槽宽度为10 mm,螺槽厚度为40 mm及螺槽间距为120 mm)的三维数值模型,以探究螺槽桩在竖向荷载作用下的荷载传递过程. 其中,螺槽桩桩身结构复杂,为保证桩身结构的整体性,采用Solidworks的螺旋线及扫描切除功能建立螺槽桩三维几何模型,后将其导入有限元软件进行计算. 螺槽桩采用二阶四面体为基本单元循环划分网格. 为保证桩体与土体接触界面网格尺寸一致,螺槽桩桩周土体应加密处理,加密区为二倍桩径. 为同时兼顾模拟精度与计算效率,经多次试算后确定模型共84 001个单元,数值模型及网格划分如图2所示. 桩体采用线弹性材料,土体采用基于Mohr-Coulomb屈服准则的弹塑性本构模型进行模拟[25],桩土界面设置面-面接触,切向行为设置罚函数,法向行为设置为硬接触,摩擦系数根据Randolph等[26]建议为界面内摩擦角的正切值. 土体与桩体的具体参数设置如表3所示. 为模拟实际试验工况,约束模型土体底部三个方向的位移及四面两个方向的侧向位移,上部土体采用自由边界. 在地应力平衡基础上,对桩体进行分级加载,与表2分级加载荷载值一致.



(a)几何模型　　(b)地应力平衡

图2　数值计算模型

Fig.2　Numerical calculation model

表3　数值计算材料参数

Tab.3　Parameters of numerical test

材料	弹性模量/MPa	重度/(kN·m^{-3})	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
桩材	7.2×10^4	27.0	0.33	—	—
土体	8.0	18.1	0.30	13.3	23.4

2　结果与分析

2.1　材料利用率

图3为等截面桩与螺槽桩桩顶荷载-沉降曲线,

加载初期二者沉降曲线基本重合,均呈平缓的线性变化,这一阶段桩体受荷较小,桩型对其承载力影响不大.随着荷载增加,螺槽桩位移逐渐小于等截面桩,螺槽与土体的咬合作用使得桩体位移减缓.加载后期等截面桩荷载沉降曲线出现陡降,桩体极限承载力为2.54 kN,而螺槽桩较等截面桩具有明显缓变特征,根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)[24]缓变的荷载-沉降曲线,桩体宜选沉降40~60 mm为其对应极限承载力,基于本文相似比,当沉降达到4 mm时,螺槽桩极限承载力为4.71 kN,较等截面桩提升了1.85倍.其中,试验与数值计算的沉降曲线趋势拟合度较高,等截面桩达到极限承载状态时,出现同试验一致的陡降,而螺槽桩则出现缓变型特性,无明显拐点.

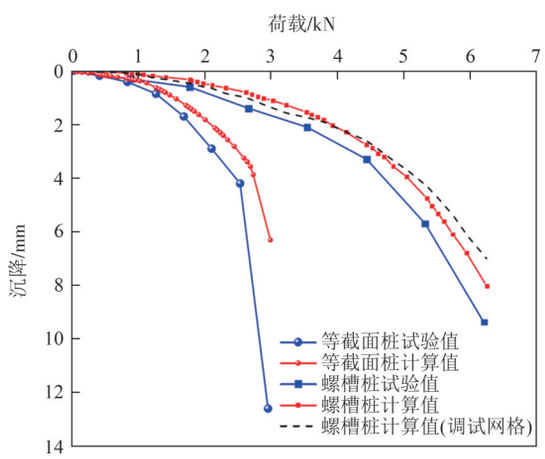


图3 螺槽桩与等截面桩桩顶荷载-沉降对比

Fig.3 Comparisons of pile-top load-settlement between screw groove pile and equal section pile

桩体的材料利用率是其设计使用的重要指标,计算方式为桩体极限承载力与桩身体积的比值[27].基于此,为更精准对比螺槽桩与等截面桩的材料利用率,引入材料利用率比λ.

$$\lambda = L_b/L_a \tag{1}$$

式中:L_a与L_b分别为等截面桩和螺槽桩的材料利用率.

螺槽桩桩身截面复杂,为计算其材料用量,需对其截面特性进行分析.图4为螺槽桩截面示意图,桩体截面可以划分为S_1与S_2两个区域,其中S_1是半径为r、角度为$(2\pi-\theta)$的内圆截面,S_2是半径为$(r+c)$、角度为θ的槽面扇形.S_2区域的角度表达公式为:

$$\theta = \frac{2\pi b}{a} \tag{2}$$

式中:a为螺槽间距;b为螺槽厚度.

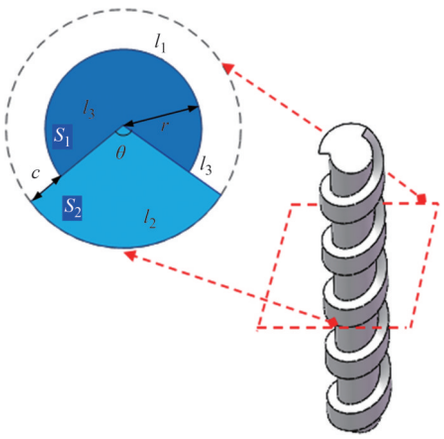


图4 螺槽桩截面示意图

Fig.4 Schematic cross-section of a screw groove pile

螺槽桩的面积表达公式为:

$$S = S_1 + S_2 = \pi r^2\left(\frac{2\pi-\theta}{2\pi}\right) + \pi(r+c)^2\frac{\theta}{2\pi} = r^2\frac{\pi(a-b)}{a} + (r+c)^2\frac{\pi b}{a} \tag{3}$$

式中:r为螺槽内半径;c为螺槽宽度.

螺槽桩截面周长表达式为:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 = 2\pi r\left(\frac{2\pi-\theta}{2\pi}\right) + 2\pi(r+c)\frac{\theta}{2\pi} + 2c = 2\pi\left(r + \frac{bc}{a}\right) + 2c \tag{4}$$

利用截面特性计算螺槽桩体积,可知其仅为等截面桩体积的62.93%.根据桩身材料利用率公式,螺槽桩材料利用率约为等截面桩的2.85倍,因此螺槽桩能够降低桩体材料用量,大幅提高材料利用效率,达到节能低碳的目的.其中,数值计算得到螺槽桩材料利用率为等截面桩的2.94倍,二者利用率差值范围在5%之内,说明有限元模型能够较好地拟合试验结果.

2.2 荷载传递机理

为深入研究等截面桩与螺槽桩的荷载传递机理,对其分级加载下桩体轴力分布特征进行分析.其中等截面桩与螺槽桩的轴力计算公式如下:

$$\begin{cases}\sigma = E \times \varepsilon \\ P = \sigma \times A\end{cases} \tag{5}$$

$$p_n = E\varepsilon\left(r^2\frac{\pi(a-b)}{a} + (r+c)^2\frac{\pi b}{a}\right) \tag{6}$$

式中:σ为桩身应力;E为弹性模量;ε为桩身应变;P为等截面桩轴力;A为等截面桩截面面积;P_n为螺槽桩轴力.

试验与有限元计算的桩身轴力分布如图5所示.

两种桩型桩身轴力分布总体特征均为沿桩身纵深方向逐渐递减,同时桩端阻力随着荷载逐渐增大,螺槽桩的减小幅度明显大于等截面桩,模拟趋势与实际试验趋势吻合较好. 试验数据表明,等截面桩达到极限荷载时桩端阻力为 1.61 kN,为桩体总极限承载力的63.38%. 而螺槽桩为缓变型桩,当加载值为4.45 kN与5.34 kN时,桩端阻力分别为1.52 kN和1.81 kN,约占承载力的34.01%. 可以看出,螺槽桩桩端相较于等截面桩的承载占比较小,其桩侧摩阻力显著大于等截面桩. 实际上,等截面桩与螺槽桩在竖向承载过程中受力机制的最大区别在于桩侧阻力的发挥程度. 在极限承载时,等截面桩侧阻力主要为桩土接触面的抗剪力,桩侧摩阻力对承载力贡献较小. 螺槽桩因其独特的螺旋形槽体结构可与土体“机械咬合”,其桩侧阻力不仅为螺槽面与土体的摩阻力,还因其异形构造形成一系列螺旋形槽面端阻力,进而叠加提升桩侧摩阻力.

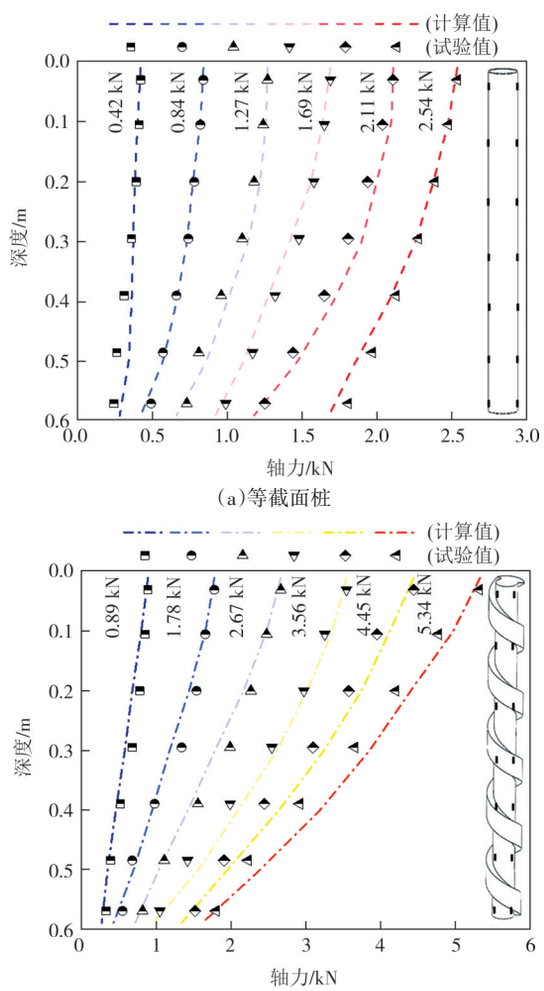


图5　桩身轴力分布特征曲线

Fig.5　Characteristic curve for axial force distribution of pile

为研究两种桩型的受力特征,以 *XZ* 面为切割平面对数值模型进行切分,得到极限受力状态下桩周土体位移与土体变形特征(塑性应变和应力分布)分别如图6、图7所示. 等截面桩极限承载时,地基土体响应为桩端出现明显的土体变形[图6(a)]及高塑性应变区[图7(a)];侧阻力源于圆柱形桩身与土体摩擦,其桩端土层为桩体承载的主要持力区. 而螺槽桩在极限承载状态下,桩土竖向位移范围显著增大,主要是因为螺槽结构可以有效地与土体咬合,以促进土体共同参与承载,充分利用土体的承载能力. 螺槽结构及桩端下部土体均出现显著土体变形[图6(b)]和高塑性变形[图7(b)],螺槽端阻力来源于螺旋结构与桩周土体受剪反力.

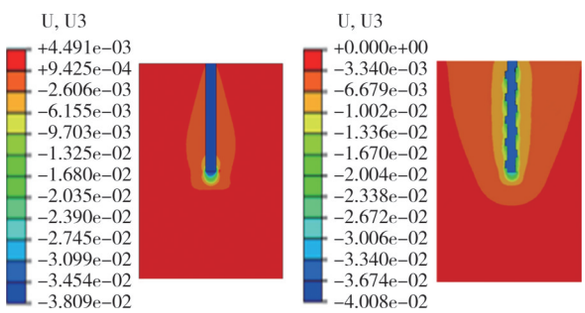


图6　桩周土体位移

Fig.6　Displacement field of pile and soil

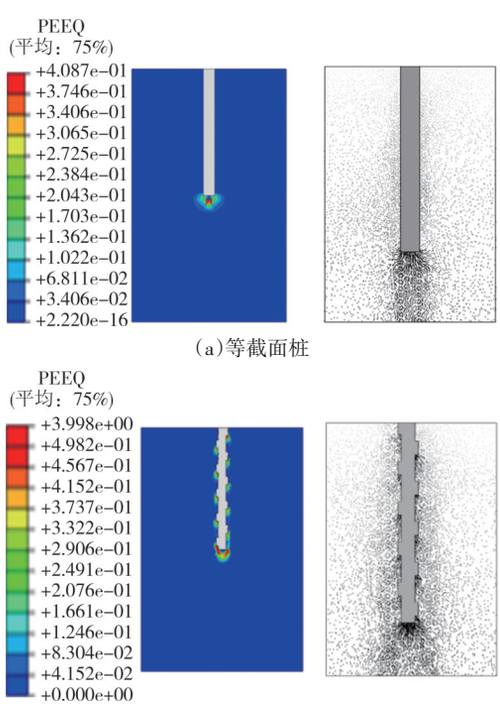
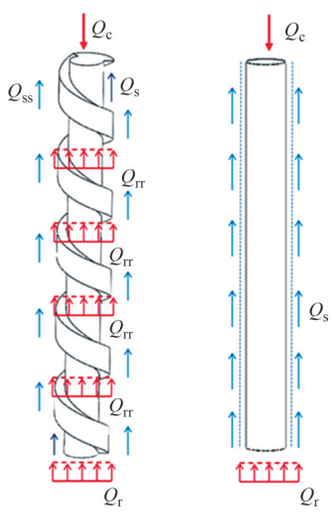


图7　桩周土塑性应变及应力分布特征

Fig.7　Characterization of plastic strain and stress distribution of soil

两种桩型在竖向承载作用下受力特征与土体破坏模式具有显著差别,图8为二者受力对比示意图,当桩体上部受到荷载时,等截面桩仅由桩侧摩阻力Q_s与桩底端阻力Q_r承担;而螺槽桩受力不仅传递于螺槽内径侧阻力Q_s与桩身端阻力Q_r,还通过螺槽结构将荷载转化由螺槽侧摩阻力Q_{ss}和螺槽底端阻力Q_{rr}共同承载,其突出的螺槽截面构造使桩体承载行为存在传递效应,承载能力在端阻与侧阻两方面均较等截面桩增强,独特的荷载传递机制使螺槽桩具有良好的承载性能.



(a)螺槽桩 (b)等截面桩

图8 螺槽桩与等截面桩受力对比示意图

Fig.8 Schematic diagram comparing for stress analysis of screw groove pile and equal section pile

3 螺槽参数分析

针对螺槽桩的截面特性,开展螺槽间距、螺槽内径、螺槽厚度和螺槽宽度对桩体承载特性影响的研究,表4为初始桩型参数.考虑经济效益,引入材料利用率比(其中桩长8 m、直径0.7 m的等截面桩极限承载力为389.4 kN),综合考虑承载需求与资源利用效率对螺槽桩进行优化设计.

表4 桩体几何参数

Tab.4 Geometric parameters of pile m

桩长h	螺槽宽度c	螺槽间距a	螺槽内径R	螺槽厚度d
8.0	0.1	1.5	0.5	0.4

3.1 螺槽间距

图9为不同螺槽间距下桩顶的荷载-沉降曲线,桩体承载力随螺槽间距增长的变化趋势总体表现为先增长后降低的两阶段发展特征.当螺槽间距为0.6、1.0、1.5、2.0、2.5 m时,桩体的极限承载力分别为748.5、775.2、547.4、439.6、368.9 kN,螺槽间距对桩体的承载性能有显著影响.当螺槽间距从0.6 m增加到1.0 m时,极限承载力增大了3.6%,当螺槽间距从1.0 m增加到2.5 m时,极限承载力降低了52.4%.这是由于螺槽桩螺距较大时会减少槽面与土体的接触面积,进而降低螺槽面端承力,削弱桩-土剪切作用,导致桩体承载性能不佳.但螺距过小使得两个相邻螺槽之间土体的滑裂阻力不能充分发挥作用,抑制螺槽桩的荷载传递效应,影响桩顶荷载向桩周土体扩散,因此出现桩体承载力随螺距先增后减的趋势.

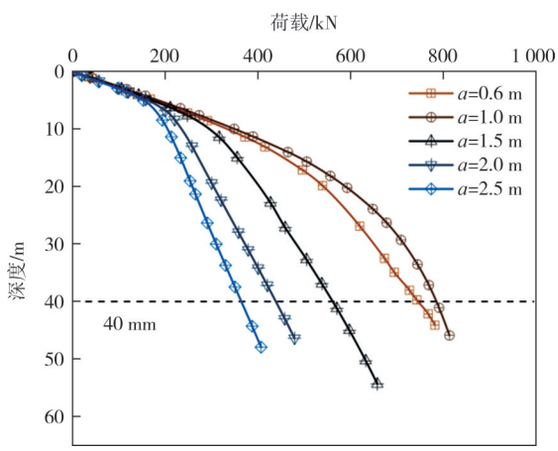


图9 不同螺槽间距桩顶荷载-沉降曲线

Fig.9 Pile-top load-settlement curves with different screw groove spacing

如图10所示,当螺槽间距从0.6 m增至2.5 m时,材料利用率比分别为2.30、2.82、2.34、1.86、1.61.螺槽桩的材料利用率比与极限承载力均呈先增后减的趋势,当间距从0.6 m增加到1.0 m时,材料利用率比增加了22.6%;当间距从2.5 m减少到1.0 m时,材料利用率比增加了75.2%.承载力与材料利用率比变化趋势表明,存在一个较优的螺槽间距,该间距可以使桩体在平衡经济因素和承载力需求之间达到最佳状态.在本文参数计算下,较优螺槽间距为1.0 m,距径比为2.该间距能够有效带动较大范围的土体共同参与承载,从而充分利用土体的承载力.因此,在实际工程设计中,应考虑最优螺槽间距,以满足经济与承载力的双重需求.

3.2 螺槽内径

根据数值计算结果得出不同螺槽内径桩顶的荷载-沉降曲线,如图11所示.当螺槽内径为0.2、0.5、

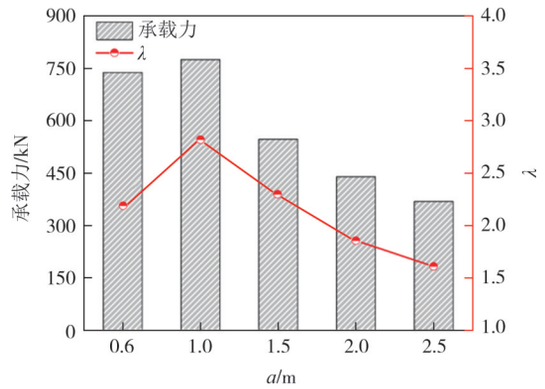


图 10　螺槽间距影响承载力与材料利用率比

Fig.10　Effect of screw groove spacing on bearing capacity and material utilisation ratio

0.8、1.3 m 时，桩体的极限承载力分别为 206.7、547.4、903.7、967.2 kN，随着内径的增加，承载力分别提升了 164.8%、337.2% 和 368.0%. 当桩体内径小于 0.8 m 时，桩体竖向位移均随荷载增加而呈现位移缓变. 桩体极限承载力增加幅度随着内径增加而急剧提升，这是由于受到内径影响桩体侧阻力及桩端阻力显著提升，桩-土接触面显著增加，进而增强了桩的承载能力. 而当螺槽内径为 1.3 m 时，直径过大导致其沉降曲线出现显著变化，产生明显线性变形而非沉降缓变. 其单桩极限承载力虽小幅度增大，但其在荷载较小时沉降整体偏大. 一方面，由于桩体在内径过大时螺旋形槽体与土体接触面比例降低，其机械咬合能力削弱，导致受力特性出现变化，螺槽面与土体的抗剪强度减弱；另一方面，螺槽桩长径比为 6 时，难以发挥其原有的受力机理和工作特性. 因此，本文建议在工程设计时螺槽桩的长径比不宜小于 6.

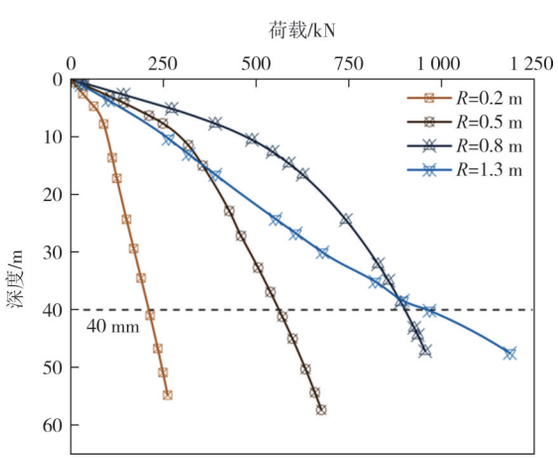


图 11　不同螺槽内径桩顶荷载-沉降曲线

Fig.11　Pile-top load-settlement curves with different inner diameter of screw groove

图 12 为不同螺槽内径下极限承载力与材料利用率比的变化曲线. 随着螺槽内径增加，极限承载力提升，但不可避免地提高了材料用量，其利用率比显著下降. 当螺槽内径从 0.2 m 增加至 0.8 m 时，材料利用率比下降了 133.8%. 螺槽内径较小，其承载力较弱，但材料利用率比显著，工程设计在重视竖向承载力的同时应充分考虑其材料利用率. 其中，当螺槽内径为 1.3 m 时，λ 小于 1.0，从材料利用率角度分析可知，长径比过小同样不利于工程使用.

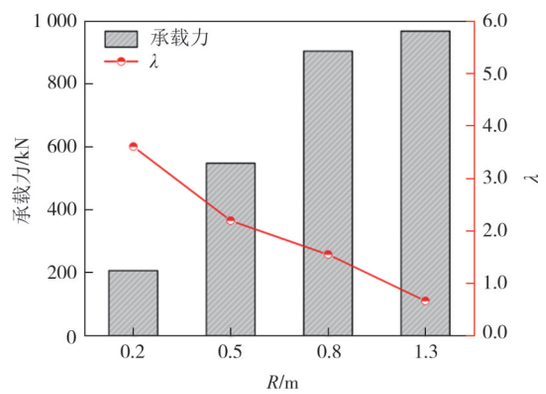


图 12　螺槽内径影响承载力与材料利用率比

Fig.12　Effect of inner diameter of screw groove on bearing capacity and material utilisation ratio

3.3　螺槽厚度

不同螺槽厚度下螺槽桩桩顶荷载-沉降曲线如图 13 所示. 相比于厚度为 0.1 m 的螺槽桩，螺槽厚度从 0.2 m 提升到 0.6 m 时，极限承载力分别增加了 6.2%、18.2%、18.7%、22.6% 及 24.1%. 表明增加螺槽厚度是提升桩体极限承载力的有效手段，但当螺槽厚度继续增加至大于 0.4 m 时，其对极限承载力的提升幅度将变得有限. 从螺槽桩的受力机理可知，增加螺槽厚度仅能增大桩土接触面积，提升侧摩阻力，但螺槽面的端承力并无明显增加，因此其承载能力增幅有限.

不同螺槽厚度下承载力与材料利用率比的变化趋势如图 14 所示. 结果表明，螺槽厚度与内径比大于 1 时，承载力无明显提升，但材料利用率比逐渐降低. 当螺槽厚度从 0.6 m 减小至 0.3 m 时，其利用率比提升了 10.6%，螺槽厚度过大不利于工程的经济效益. 当螺槽厚度小于 0.2 m 时，其材料利用率比相近，但承载力降低. 螺槽厚度过小易造成螺槽面端与内圆截面衔接处的破坏，不利于桩体长期承载性能发挥.

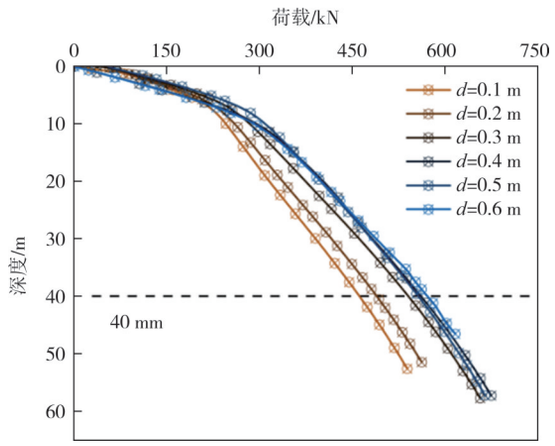


图 13 不同螺槽厚度桩顶荷载-沉降曲线

Fig.13 Pile-top load-settlement curves with different screw groove thicknesses

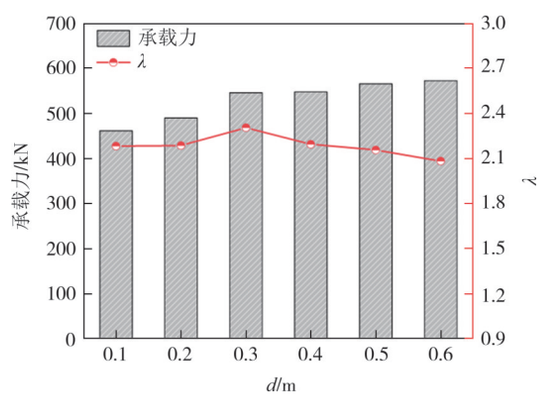


图 14 螺槽厚度影响承载力与材料利用率比

Fig.14 Effect of screw groove thicknesses on bearing capacity and material utilisation ratio

3.4 螺槽宽度

图 15 为不同螺槽宽度下桩顶的荷载-沉降曲线. 沉降曲线分布特征表明,桩体在初期加载阶段不再近乎重合,但仍呈现位移缓变趋势,当螺槽宽度为 0.10、0.25、0.40、0.65 m 时,桩体的极限承载力分别为 547.4、933.3、1 233.6、1 569.2 kN. 当螺槽宽度从 0.10 m 增加至 0.25 m 时,承载力增加了 70.5%. 当宽度从 0.40 m 增加至 0.65 m 时,承载力增加了 27.2%. 说明螺槽宽度对桩体的承载性能有显著影响,宽度对极限承载力具有明显的提升效果. 螺槽宽度增大,直接提升了桩土接触面积与螺槽面端阻,此时接触面积导致的槽面侧阻力增加对桩体承载能力的提升有限,说明螺槽面端阻使得桩体受力性能显著增强. 但宽度的增加不可避免地提高了材料用量,资源利用效率也是其设计使用的重要指标.

图 16 为不同螺槽宽度下极限承载力与材料利用率比的变化曲线. 与增加螺槽宽度对极限承载力

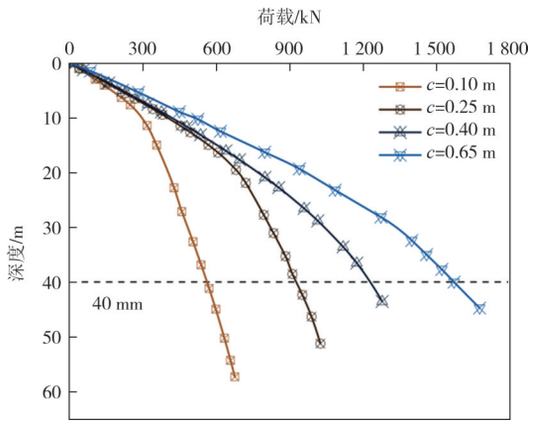


图 15 不同螺槽宽度桩顶荷载-沉降曲线

Fig.15 Pile-top load-settlement curves with different screw groove width

的提升作用不同,随着螺槽宽度增加,材料利用率比呈现先增后减的趋势. 螺槽宽度为 0.10、0.25、0.40、0.65 m 时,材料利用率比分别为 2.19、2.61、2.45、1.88. 当螺槽宽度从 0.1 m 增加到 0.25 m 时,材料利用率比提升了 19.2%,而螺槽宽度从 0.25 m 增加到 0.65 m 时,材料利用率比减少了 28.0%. 螺槽宽度的增大使得螺槽面挤压土体截面增大,槽面端承载过程形成滑裂面,宽度过大会导致滑裂面形成相交状态. 继续增大螺槽宽度虽然能够提升桩体的承载力,但其增效作用逐渐减弱. 同时,宽度的增加会显著增加桩体所需的材料量,导致材料利用率比呈现出先增大后减小的趋势. 因此,在实际螺槽桩宽度设计中,应结合具体工况,在保证承载力满足要求的前提下,最大幅度节约桩身材料.

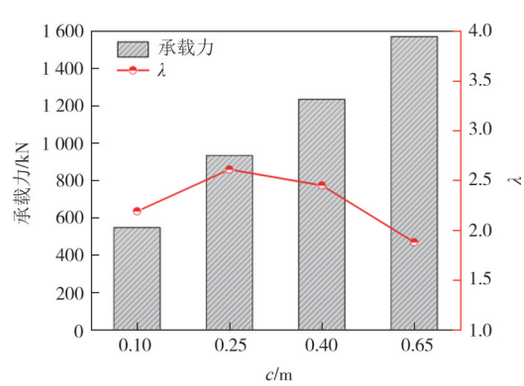


图 16 螺槽宽度影响承载力与材料利用率比

Fig. 16 Effect of screw groove width on bearing capacity and material utilisation ratio

4 结 论

螺槽桩是一种桩身具有特殊螺旋形槽体结构的

新型预制桩,分析其截面特征与受力机理,并从材料利用率与承载力两方面分析螺槽参数对其承载性能的影响,主要结论如下:

1)螺槽截面的突出构造使桩体侧阻力增益明显,同时螺槽端与桩端共同承载形成多点端阻承载模式,承载性能在端阻与侧阻两方面均较等截面桩增强.相较于等截面桩,螺槽桩极限承载力提升了1.85倍,体积仅为其62.93%,材料利用率为其2.85倍,螺旋形槽体的存在可带动更多土体共同承载,增强了桩周土与桩体的相互作用.土体承载力得到充分利用,进而大幅提升桩体的材料利用率,达到节约资源的目的.

2)螺距过小会抑制螺槽桩的荷载传递,影响其应力扩散效应的发挥;螺距较大会降低桩侧摩阻力与螺槽面端阻力,进而降低承载力.螺槽桩材料利用率与极限承载力同时出现先增后减的现象,存在较优螺槽间距可平衡极限承载力与材料利用率的需求.螺槽厚度从0.1 m增加至0.6 m时,极限承载力仅增加了24.1%,厚度可以增强极限承载力,但其增长幅度较小.

3)螺槽内径从0.2 m增加到0.8 m时,极限承载力增大了337.2%,材料利用率比下降了133.8%,实际工程中螺槽内径的设计应充分考虑承载力与材料利用率的平衡.螺槽宽度增加使得桩体极限承载力显著提升,但材料利用率出现先增后减的趋势.实际工程需结合当地土质情况合理设计螺槽宽度,以达到最大幅度利用桩身材料的目的.

参考文献

[1] 高文生,梅国雄,周同和,等. 基础工程技术创新与发展[J]. 土木工程学报,2020,53(6):97-121.
GAO W S, MEI G X, ZHOU T H, et al. Innovation and development of foundation technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 97-121.(in Chinese)

[2] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报,2016,49(1):96-115.
LIU H L, ZHAO M H. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016,49(1):96-115.(in Chinese)

[3] 邓友生,李文杰,冯忠居,等. 刚性桩-半刚性桩-土工格栅增强路基承载及影响参数[J]. 中国公路学报,2024,37(2):209-218.
DENG Y S, LI W J, FENG Z J, et al. Bearing characteristics and influence parameters of rigid pile-semi-rigid pile-geogrid reinforced subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024,37(2):209-218.(in Chinese)

[4] 邓友生,庄子颖,董晨辉,等. 竖向荷载下螺钉桩承载特性的影响因素[J]. 河北大学学报(自然科学版),2024,44(6):571-580.
DENG Y S, ZHUANG Z Y, DONG C H, et al. Influencing factors for bearing characteristics of screw pile under vertical load[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2024, 44(6): 571-580.(in Chinese)

[5] THUSOO S, OBARA T, KONO S, et al. Design models for steel encased high-strength precast concrete piles under axial-flexural loads[J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111465.

[6] 邓友生,庄子颖,肇慧玲,等. 黄土层螺钉桩承载特性试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(1): 129-137.
DENG Y S, ZHUANG Z Y, ZHAO H L, et al. Experimental study on bearing characteristics of screw-pile in loess layer[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(1): 129-137.(in Chinese)

[7] ZHANG Y T, HUANG J S, GIACOMINI A. Bayesian updating on resistance factors of H-piles with axial load tests[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105421.

[8] 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.

[9] 李绪勇,杨忠平,刘纲,等. 隔离式螺旋桩抗压承载与抗地基冻融特性[J]. 岩土工程学报,2024,46(6):1187-1196.
LI X Y, YANG Z P, LIU G, et al. Characteristics of compressive bearing capacity and resistance to foundation freeze-thaw of the isolation helical pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(6): 1187-1196.(in Chinese)

[10] 胡安峰,陈正,肖志荣,等. 水平激振下饱和土中楔形桩动力阻抗分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(5):181-190.
HU A F, CHEN Z, XIAO Z R, et al. Dynamic impedence analysis of tapered pile in saturated soil under horizontal vibration [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(5): 181-190.(in Chinese)

[11] 王博宇,胡志平,张永辉,等. 成层土中考虑桩侧土竖向作用的螺纹桩动力响应[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(9):161-170.
WANG B Y, HU Z P, ZHANG Y H, et al. Dynamic response of screw pile considering vertical action of pile side soil in layered soil[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2024, 56(9): 161-170.(in Chinese)

[12] LÜ Y R, NG C W W, LAM S Y, et al. Comparative study of Y-shaped and circular floating piles in consolidating clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(9): 1483-1494.

[13] 王新泉,任连伟,杨权威,等. Y形桩与圆形桩承载性能对比模型试验[J]. 中国公路学报,2016,29(5):11-18.
WANG X Q, REN L W, YANG Q W, et al. Comparative model tests on bearing behavior between Y-section pile and circular pile [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(5): 11-

18.(in Chinese)

[14] 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)

[15] 周佳锦,龚晓南,王奎华,等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):570-576.
ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 570-576.(in Chinese)

[16] CHEN L, ZHUANG Y Z, SONG K S, et al. Novel HS-RC stepped pile foundation: Experimental and numerical evaluation [J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117196.

[17] 邓友生,李龙,赵衡,等. 基于透明土的梅花桩沉桩挤土效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):205-213.
DENG Y S, LI L, ZHAO H, et al. Plum-blossom pile penetration effect based on transparent soil[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 205-213.(in Chinese)

[18] LI L, DENG Y S. Strengthening mechanism of plum blossom pile composite foundation[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(7): 4791-4808.

[19] 丁选明,巫崇荣,瞿立明,等. 斜坡地形单桩竖向承载特性模型试验与数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2020,42(3):1-9.
DING X M, WU C R, QU L M, et al. Model test and numerical simulation of vertical bearing capacity for single pile in slope[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 1-9.(in Chinese)

[20] 陈杨,杨敏,魏厚振,等. 钙质砂中单桩轴向抗拔模型试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(8):2851-2857.
CHEN Y, YANG M, WEI H Z, et al. Experimental study on axial tension response of model monopile in calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2851-2857.(in Chinese)

[21] 张聪,冯忠居,王富春,等. 基于离心模型试验的近断层桥梁桩基竖向承载特性研究[J]. 土木工程学报,2023,56(6):108-116.
ZHANG C, FENG Z J, WANG F C, et al. Study on vertical bearing characteristics of pile foundation of near-fault bridge based on centrifugal model test [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(6): 108-116.(in Chinese)

[22] 董俊利,冷伍明,徐方,等. 列车荷载作用下新型预应力路基振动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(11):2847-2860.
DONG J L, LENG W M, XU F, et al. Study on vibration characteristics of a new prestressed subgrade under train loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2847-2860.(in Chinese)

[23] FIORAVANTE V. On the shaft friction modelling of non-displacement piles in sand [J]. Soils and Foundations, 2002, 42(2): 23-33.

[24] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.(in Chinese)

[25] 张玉伟,周鹏远,宋战平,等. 黄土地区既有多股道运营铁路架空体系动力特性研究[J]. 振动与冲击,2023,42(18):206-216.
ZHANG Y W, ZHOU P Y, SONG Z P, et al. Dynamic characteristics of the overhead system under the existing multi track railway in loess area[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 206-216.(in Chinese)

[26] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. Géotechnique, 1981, 31(1): 143-157.

[27] 周杨, 肖世国, 徐骏,等. 变截面螺纹桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(3):747-754.
ZHOU Y, XIAO S G, XU J, et al. Model test on vertical bearing capacity of variable cross-section thread piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 747-754.(in Chinese)