

现浇混凝土大直径管桩力学特性研究综述

杨红亮, 王东会*, 李成军, 甄鑫强, 杨磊

(哈尔滨市勘察测绘研究院, 黑龙江 哈尔滨 150010)

摘要: 软土地区具有高含水率、大孔隙比、低承载力及高压缩性等特点, 传统桩基面临成桩质量差、承载效率低等问题。现浇混凝土大直径管桩(PCC桩)作为一种适用于软土地基处理的新型桩基技术, 其力学特性对工程安全与性能具有重要影响。本文系统综述了PCC桩在内摩阻力、负摩阻力、竖向承载、水平承载及抗拔性能等方面的力学特性研究进展, 总结了室内模型试验、现场试验、有限元与离散元数值模拟、理论推导等多技术路径的研究成果, 明确了各力学特性的影响因素、分布规律及计算方法。分析表明, 当前研究在内摩阻力的量化表征、负摩阻力时变演化机制、复杂荷载作用下的响应特性及群桩相互作用等方面仍存在不足。未来研究应注重多方法耦合、精细化建模与工程实测试验, 以提升PCC桩设计的科学性与工程适用性, 从而推动该技术在高速铁路、港口工程及抗浮结构等领域的更广泛应用。

关键词: PCC桩; 力学特性; 软土地基; 内摩阻力; 负摩阻力; 桩-土相互作用; 承载特性; 复合地基

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0022-09

Review of the mechanical behavior of cast-in-place concrete large-diameter pipe piles

YANG Hongliang, WANG Donghui*, LI Chengjun, ZHEN Xinqiang, YANG Lei

(Harbin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Harbin Heilongjiang 150010, China)

Abstract: Soft soil regions are characterized by high water content, large void ratio, low bearing capacity, and high compressibility. Traditional pile foundations often face challenges such as poor construction quality and low bearing efficiency in such ground. The cast-in-place concrete large-diameter pipe pile (PCC pile), as a novel foundation technology suitable for soft soil improvement, has its mechanical behavior critically important for engineering safety and performance. This paper systematically reviews the research progress on the mechanical behavior of PCC piles, including internal friction resistance, negative skin friction, vertical bearing, horizontal bearing, and pull-out resistance. It summarizes findings from multiple technical approaches, such as laboratory model tests, field tests, finite element and discrete element numerical simulations, and theoretical derivations. The influencing factors, distribution patterns, and calculation methods for each mechanical characteristic are clarified. Analysis indicates that current research still has shortcomings in the quantitative characterization of internal friction resistance, the time-dependent evolution mechanism of negative skin friction, the response under complex loading conditions, and pile group interaction effects. Future research should focus on the coupling of multiple methods, refined modeling, and validation through engineering field measurements to enhance the scientific basis and practical applicability of PCC pile design, thereby promoting broader application of this technology in high-speed railways, port engineering, anti-floating structures, and related fields.

Key words: PCC pile; mechanical behavior; soft soil foundation; internal friction resistance; negative skin friction; pile-soil interaction; bearing characteristics; composite foundation

收稿日期: 2025-08-22; 修回日期: 2025-11-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.004

第一作者: 杨红亮, 男, 汉族, 1970年生, 正高级工程师, 地质工程专业, 主要从事工程地质、地质灾害治理等工作, 黑龙江省哈尔滨市道里区西四道街29号, 1729801666@qq.com。

通信作者: 王东会, 男, 汉族, 1989年生, 高级工程师, 岩土工程专业, 硕士, 长期从事岩土工程勘察设计工作, 黑龙江省哈尔滨市道里区西四道街29号, wdh1666@163.com。

引用格式: 杨红亮, 王东会, 李成军, 等. 现浇混凝土大直径管桩力学特性研究综述[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 22-30.

YANG Hongliang, WANG Donghui, LI Chengjun, et al. Review of the mechanical behavior of cast-in-place concrete large-diameter pipe piles[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 22-30.

0 引言

现浇混凝土大直径管桩(PCC桩)加固技术是由刘汉龙等^[1-2]研发的适用于软土地区新型复合地基处理技术,主要应用振动沉模技术形成特定腔体,然后浇筑混凝土后分段振动拔模而形成的大直径管桩,因模板的护壁作用,桩体一般不会出现缩颈等现象。施工过程中PCC桩一般不需配筋,外径宜为1 m(壁厚 ≥ 0.12 m)、1.25 m(壁厚 ≥ 0.15 m),褥垫层厚度为0.3~0.5 m,桩间距为2.5~4倍桩径,沉管下沉速度不大于2 m/min,拔管过程中应边沉边拔,软弱土层中速度应控制在0.6~0.8 m/min。其成桩效果如图1所示,相比于预应力高强度混凝土管桩(PHC管桩)优势明显。PHC管桩由于锤击力控制难度大、挤土效应显著、桩基移动困难、桩帽易偏心等问题,在软土地区应用可能出现沉桩长度不足、断桩、桩头损坏、桩身倾斜等不良情况^[2-12]。PCC桩因具有直径大、成桩过程可控性强、不需要接桩等特点,成桩质量高,后期维护费用低,且承载力大、沉降量小,现已在港口、高速公路、铁路、市政道路等工程中广泛应用。如在天津威乌高速中使用桩长16~18 m、桩径1 m、壁厚0.12 m的PCC桩,间距3 m正方形布桩,未出现断桩、缩颈等不良现象,其复合地基承载力为160 kPa,试验荷载在1600 kN左右时桩顶最大沉降量为18 mm,桩基承载力大,沉降小^[13-14]。



图1 PCC桩
Fig.1 PCC pile

在实际工程中PCC桩主要通过侧摩阻力和桩端阻力承担上部荷载^[1],对于高大建(构)筑物、高速铁路、海堤等工程还需承担水平荷载。特定条件下,还会产生负摩阻力等不利情况,导致桩的承载能力降低,甚至破坏上部结构,影响建(构)筑物的

正常使用。因此PCC桩力学特性的影响因素、形成条件、产生机理、分布规律、计算理论等在桩体设计中占有重要地位,故结合已有成果对PCC桩的力学特性进行研究具有重要意义。鉴于此,本文对近年来有关软土地区中PCC桩力学特性的研究历程及现状进行了综述,指出了现阶段存在的问题,并提出了今后的研究方向和发展前景。

1 内摩阻力特性

PCC桩现场成桩过程中,现场试验的条件受到限制,因此现阶段对于PCC桩内摩阻力的研究主要集中在有限元分析和室内模型试验上。

资料显示^[1,15-17],由于PCC桩内部桩芯土的存在,桩芯土可发挥摩擦作用并分担上部荷载,故无论是PCC单桩还是其复合地基,抵抗沉降的能力均强于无桩芯土的桩型。静载荷作用下,PCC桩内摩阻力的发挥滞后于侧摩阻力且其作用远不如侧摩阻力。内摩阻力在发挥过程中由下向上逐渐扩展,当其在桩承载力中发挥较大作用时,可以用指数函数拟合其分布规律,其大小受水平土压力系数比(即水平土压力系数与其初始值之间的比值)和有效长度(即内摩阻力为 0.1α 时拟合曲线上对应的坐标值, α 为拟合曲线的系数)的影响较大。卢长娜等^[18]在此基础上简化约束条件,给出了复合地基条件下内摩阻力的计算公式。

综上,内摩阻力作为承担上部荷载的一部分,可以预防桩体的沉降,所以内摩阻力的研究对于PCC桩的实际工程应用具有重要的理论及现实意义。当前针对桩基及PCC桩内摩阻力的研究已形成多技术路径探索格局^[19-21]。一方面,通过桩基模型试验,学者分析了褥垫层变化对内摩阻力的影响;另一方面,借助离散元方法,将桩芯土视为自桩端向上加载且随管桩整体移动的“柔性桩”进行模拟,研究发现内摩阻力随桩顶位移增加而增大。同时,这些研究也明确了PCC桩的桩芯土具备减沉效应。如表1所示。

尽管研究取得一定进展,仍存在多方面待深化之处:

(1)利用有限元法高效计算连续介质宏观响应的优势,结合离散元法精准模拟非连续介质颗粒运动的特点,通过模型试验数据校准数值模型参数,解决单一方法在复杂土层中内摩阻力模拟精度不

表1 基桩内摩阻力核心研究成果汇总

Table 1 Summary of core research achievements on the internal friction resistance of pile foundations piles

| 序号 | 研究对象 | 核 心 发 现 | 研究方法 | 应用场景参考 | 备 注 |
|----|------|--|--------|---------------|------------|
| 1 | 管桩 | 砂土地基中,将桩芯土视为“柔性桩”,自桩端向上加载且随管桩整体移动,发现内摩阻力随桩顶位移增加而增大 | 离散元方法 | 砂土地基中单桩竖向承载工程 | 揭示微观作用机制 |
| 2 | PCC桩 | 褥垫层参数(加筋材料层数)变化直接调控内摩阻力的发挥程度 | 桩基模型试验 | 含褥垫层的复合地基加固工程 | 明确单一变量影响规律 |

足的问题。

(2)针对动载荷(如交通荷载)作用场景,引入黏弹性、弹塑性等动态参数,模拟动载下桩土界面的力学响应,探究内摩阻力的动态演化规律。

(3)结合离散元法对桩芯土“柔性桩”特性的揭示,探索PCC桩轴向力作用下内摩阻力与桩顶位移的数学表达式,验证复合地基计算公式在PCC桩软土地基加固中的适用性。

(4)优化离散元计算方法,引入并行计算、简化颗粒接触模型等技术,降低计算资源消耗,提升其在群桩、长期服役工况下内摩阻力研究中的计算效率,推动离散元法从“机理揭示”向“工程实用”转化。

2 负摩阻力特性

PCC桩加固软土地基,当季节性冻土融化或地面有较大堆载时,桩周土层的沉降量易大于桩的沉降量,从而产生负摩阻力^[22]。负摩阻力会像上部荷载一样作用在桩上,进而增加桩身沉降量,使桩的承载能力降低,且PCC桩的桩径较大,一般在1000~1500 mm^[1],负摩阻力不能忽略。因此,开展负摩阻力的研究可以了解负摩阻力的产生机制,寻找避免或消除的措施。

负摩阻力的计算方法主要有荷载传递法、弹性理论分析法、有效应力法和经验法。由于滑动摩擦系数和法向正应力是影响摩阻力的关键因素,而有效应力的大小直接影响法向正应力,因此有效应力法对于负摩阻力的求解较为准确,实际应用也较为广泛。2005年以来,学界对PCC桩负摩阻力的研究从基础理论推导逐步向工程实用深化^[5,23-26]。首先以桩内部不产生负摩阻力为核心前提,结合桩不封顶、桩顶无荷载且与土体变形协调、桩周土为弹性均质半无限体且仅产生竖向变形的假设,推导得出桩负摩阻力计算公式;随后结合试验数据进行完

善,提出负摩阻力是有效应力与桩土相对位移共同作用的结果,指出有效应力法计算结果为实际负摩阻力的极限情况,并借助中性点理论进一步给出简化计算公式;接着突破既有研究局限,将桩芯土正摩阻力纳入分析范畴,建立均质条件下PCC桩负摩阻力传递的弹性微分方程,为桩身沉降计算提供关键理论支撑;后续研究则聚焦桩埋深、桩土相对位移等核心影响因素,针对性构建桩侧负摩阻力计算模型并求取解析解,提升量化计算精度;最后通过现场数据采集,明确桩侧负摩阻力的分布特征与变化规律,同时提出可实施的负摩阻力降低措施,形成从理论建模到工程应用的完整研究体系。具体情况见表2。

综上,对于PCC桩负摩阻力的计算方法存在局限性,因此有必要针对以下4方面内容深入研究:

(1)结合PCC桩负摩阻力的非线性、时变性特征,开展非均质土、饱和软土等复杂土层中的理论建模研究;同时,拓展特殊工况(如长期荷载)下的负摩阻力演化模型,提升理论与工程实际的契合度。

(2)深入分析群桩效应、施工工艺、桩顶封闭等未充分涉及的影响因素,建立多因素耦合的负摩阻力计算体系,完善量化计算方法。

(3)开发高精度、长期稳定的现场测试技术,强化不同地质、工况下的实测数据积累,通过室内模型试验与现场试验相结合,为理论模型验证提供更全面的支撑。

(4)系统评估现有减小负摩阻力措施的长期有效性,研发适配复杂工况的新型防控技术,结合数值模拟与实体工程,建立兼顾安全性、经济性与实用性的工程优化方案体系。

3 竖向承载特性

PCC桩竖向承载力主要受桩身尺寸、地层条

表2 PCC桩负摩阻力研究演进汇总

Table 2 Summary of research evolution on negative skin friction of PCC piles

| 研究阶段 | 时间区间 | 核心假设、突破点 | 核 心 成 果 | 技 术 价 值 |
|--------|------------|--|--|----------------------------------|
| 基础理论推导 | 2005年及以前 | (1)桩内部不产生负摩阻力; (2)桩不封顶、桩顶无荷载,与土体变形协调; (3)桩周土为弹性均质半无限体,仅产生竖向变形 | 推导得出PCC桩负摩阻力基础计算公式 | 奠定负摩阻力量化分析的理论基础,为后续研究提供初始计算框架 |
| 认知完善 | 2006—2015年 | (1)突破单一因素假设,明确负摩阻力是有效应力与桩土相对位移共同作用的结果; (2)引入中性点理论; (3)将桩芯土正摩阻力纳入负摩阻力分析范畴 | (1)修正有效应力法计算偏差,指出其结果为实际负摩阻力的极限情况; (2)提出负摩阻力简化计算公式; (3)建立均质条件下PCC桩负摩阻力传递的弹性微分方程 | 完善负摩阻力作用机理认知,提升计算方法的合理性与适用性 |
| 精准量化 | 2016—2024年 | 聚焦桩埋深、桩土相对位移等核心影响因素,强化参数敏感性分析 | (1)针对性构建桩侧负摩阻力计算模型; (2)求取模型解析解,提升量化计算精度 | 实现负摩阻力从“定性描述”到“精准量化”的跨越 |
| 工程实施 | 2025年至今 | 结合实际工程场景,开展大规模现场数据采集与验证 | (1)明确桩侧负摩阻力的分布特征与变化规律; (2)提出可实施的负摩阻力降低措施 | 形成“理论建模-量化计算-工程应用”的完整体系,直接指导工程实践 |

件、施工因素等影响^[27],由桩的内外摩阻力和桩端阻力组成^[1,28-29]。侧摩阻力的产生是桩土间相对位移与土体抗剪能力共同作用的结果。当桩顶荷载较小时,桩身仅产生弹性压缩,未与土体形成相对位移,则不产生侧摩阻力;当桩与周围土体产生相对位移时,侧摩阻力由浅到深逐步发挥,随着桩侧摩阻力的发挥,桩端与持力层的相对压缩变形不断增加,当持力层开始出现塑性变形时,桩端承载力逐渐上升^[30-31]。由前面的论述可知,对于桩壁摩阻力的确定缺乏量化指标。当前对于竖向承载力的计算主要集中在数据拟合及有限元软件等的定性分析上,因此在PCC桩实际工程应用的初期设计中需用复合地基竖向承载力的计算公式进行粗略估计^[3,31-32]。侧摩阻力与土的侧压力系数、有效重度、内摩擦角正相关,桩端阻力与土的软硬状态、黏聚力、内摩擦角正相关。多桩基础中,由于桩与桩之间土层的挤压作用,导致群桩的总承载力小于单桩承载力和桩数的乘积,产生群桩效应。若桩端持力层下方存在软弱土层,需验算下卧层的承载力,避免荷载传递至下卧层后导致沉降过大。

综上,对于单桩竖向承载力的研究应从本质入

手,可以集中在桩的几何尺寸、桩土刚度比、桩端土破坏规律等影响因素及荷载的传递机理等方面。同时,需结合土层条件,合理布置桩长,使桩体的浅部与深部侧摩阻力协调发挥,避免浅部先破坏导致基桩失稳等不良现象出现。群桩承受荷载时,桩间土同时承受多根桩的侧向挤压和竖向剪切,形成应力扩散叠加区,应力集中区域的范围、大小与桩距、土质、桩长等的关系需要量化^[33]。

4 水平承载特性

随着PCC桩应用领域的拓展,如海港码头、海堤、高速铁路等工程中,桩身需承受水平荷载,对于PCC桩水平承载特性的研究可以为工程应用提供理论依据。

针对PCC桩及相关桩基的水平承载特性研究,已形成多试验手段与多元技术方法相结合的系统探索格局,研究深度与广度随技术发展持续拓展,核心成果涵盖特性分析、影响因素探究、计算方法优化等多个维度^[2,34-46]。

试验研究方面,综合采用室内模型试验、现场水平静载荷试验、大型模型槽足尺试验及静载足尺

试验等多种方式,为水平承载特性分析提供了丰富的实测数据支撑。室内模型试验作为早期研究的重要手段,为初步揭示PCC桩水平承载特性的基本影响因素奠定了基础;现场水平静载荷试验凭借贴近工程实际的优势,不仅用于分析加筋PCC桩等改良型桩体的水平承载表现,还探究了基桩在水平承载作用下的破坏机理,明确了各类因素对水平承载力的调控效应;足尺试验与大型模型槽试验为精准捕捉复杂地基条件下桩体的受力与变形特征创造了条件,尤其在双层地基及复合地基场景下的PCC桩工作特性研究中发挥了关键作用。

技术方法应用层面,除传统试验手段外,数值计算方法得到广泛应用,同时,层次分析法等数学工具也被用于量化分析水平承载力的控制要素。通过数值模拟与有限元分析,研究人员能够精准复刻水平荷载作用下桩体与地基的相互作用过程,深入探讨各类参数对承载特性的影响机制;有限差分程序的开发则为多层地基中PCC桩体各节点的位移与受力计算提供了高效工具,显著提升了工程设计计算的便捷性;层次分析法则为科学识别水平承载力的关键控制因素提供了系统的分析框架,使影响因素的优先级排序更具客观性。

研究内容上,全面覆盖了水平承载特性的核心研究方向。在基础特性研究中,明确了PCC桩水平荷载的分布规律、桩身位移与地基反力系数的变化特征,以及水平承载过程中的变形和受力规律,证实了PCC桩在水平承载特性上相较于实心灌注桩的显著优越性;在影响因素探究方面,系统分析了桩径、桩长、竖向荷载等关键参数对水平承载力的作用效应,得出了水平承载力随桩径、桩长、竖向荷载增加而增大的结论,还揭示了桩长达到临界值后水平承载能力趋于稳定的重要规律,此外针对加筋PCC桩的特殊构造,专门开展了其水平承载特性的针对性研究,拓展了PCC桩改良型结构的应用认知;在计算方法优化上,基于大量试验数据与数值分析结果,提出了黏土中PCC桩水平极限承载力的简化计算方法。尽管现有研究已构建较为完整的PCC桩及相关桩基水平承载特性研究体系,但仍存在诸多待深化的方向:

(1)PCC桩群桩效应的研究只集中在其影响因素和单桩作用特性上^[47-48],应揭示群桩布置形式、桩间距、地基土类型等因素对水平承载特性的耦合影

响机理,并明确群桩与单桩水平承载特性的差异规律,弥补当前研究在工程实用计算方法上的欠缺。

(2)选取典型工程案例,开展不同模拟软件的对比研究,建立数值模拟参数校准标准与效果评价体系,形成标准化的模拟流程,提升数值方法指导工程设计的可靠性。

(3)构建PCC桩桩身水平荷载的统一量化指标体系,明确不同工况下指标阈值与取值标准,优化土体极限抗力计算模式,通过参数调整确立统一极限抗力分布模型,降低简化计算误差^[49];并探究竖向荷载与水平荷载耦合作用下PCC桩的水平承载特性,建立复杂荷载条件下的承载力计算方法。

(4)循环荷载作用下桩的承载能力受循环荷载幅值和频率影响显著^[50],应针对海港码头、高速铁路等实际应用场景,开展不同幅值、频率的循环荷载试验,揭示水、风等循环荷载对PCC桩水平承载力、变形特性及破坏机理的影响规律,建立循环荷载下PCC桩水平承载性能的衰减模型与长期稳定性评估方法,为复杂环境下工程设计提供理论支撑。

5 抗拔承载特性

PCC桩一般不配筋,很少作为抗拔桩,其抗拔承载力与桩径、桩侧表面抗压极限侧阻力成正比^[33]。PCC桩兼具大直径、桩内外侧均与土直接接触等特点,可以考虑桩身配筋作为抗拔桩进行使用。例如,北京某地下场馆地下室抗浮工程中,采用配筋PCC桩结合水泥土复合工艺,其位移量仅为传统钻孔灌注桩的1/3,显著提升了抗拔稳定性^[51]。

基于这些工程实践,后续可围绕以下核心方向开展研究:

(1)结合配筋PCC桩大直径、桩内外侧均与土体接触的结构特性及不同地质条件的土体力学参数,考虑桩径、桩长、配筋率、土体抗剪强度等关键影响因子,拟合弹塑性等阶段位移-荷载曲线变化特征。

(2)利用多种手段,综合分析上浮荷载作用下桩芯土的约束效应、应力传递路径,以及桩侧土的摩阻力发挥过程,揭示抗拔承载力沿桩身的分布形态,为优化桩身配筋设计、提升抗拔效率提供理论支撑。

(3)通过静载试验过程中钢筋应变片、混凝土应变计的同步数据采集,研究不同加载等级下钢筋

与混凝土的应变发展规律,明确二者实现协同变形的配筋率阈值、钢筋布置形式及锚固构造要求,提出二者协同工作的设计参数优化措施。

6 结论

PCC桩力学特性是一个复杂的桩土作用过程,通过对PCC桩力学特性的综述,阐述了其影响因素、形成条件、产生机理、分布规律、计算理论等研究现状,突出了内摩阻力计算、负摩阻力防控、承载力确定等理论研究成果,阐述了作用机理不明确、计算方法不完善、工程适配性不足等问题,提出抗拔领域的应用拓展方向,为研究方向的多元化拓展提供了思路。得到的主要结论如下:

(1)虽然内摩阻力多路径研究成果初现,但仍需推动有限元与离散元耦合及与模型试验联动,使其适配动载等特殊工况,完善量化指标与计算体系,开发低成本室内动态试验装置及高效计算技术,明确内摩阻力的计算方法与取值范围,优化《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规范》(JGJ/T 213—2010)“侧摩阻力+桩端阻力+内摩阻力”的协同计算体系,减少实际承载力与理论估算的偏差,提升复杂场景模拟精度与工程实用性。

(2)负摩阻力研究需优化复杂条件与特殊工况下的理论模型,探究群桩效应等多因素耦合机制,完善高精度试验技术与数据积累,优化防控措施并构建工程优化方案体系,提升适配性与实用性。

(3)PCC桩的竖向承载力主要取决于桩侧摩阻力与桩端阻力,可根据相关规程进行初步估算。准确评估其摩阻力,是精确确定竖向承载力的关键。

(4)水平承载力研究需结合工程场景,揭示布置形式、桩间距等多因素的影响,并通过软件模拟与试验参数校准,探究循环荷载等复杂条件下承载性能衰减与稳定性评估模型,并构建水平荷载量化体系,研究复杂荷载条件下水平承载力计算方式。

(5)PCC桩可通过桩身配筋获得抗拔性能好的结构优势,通过抗拔静载试验实现钢筋-混凝土协同工作,明确其在地下车库、深基坑等抗浮工程中的应用参数与施工工艺,最终形成配筋PCC桩抗拔设计标准。

致谢:在本文的撰写过程中,刘汉龙院士提供了现场施工图片,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] 刘汉龙,费康,周云东,等.现浇混凝土薄壁管桩内摩阻力的数值分析[J].岩土力学,2004,25(S2):211-216.
LIU Hanlong, FEI Kang, ZHOU Yundong, et al. Numerical simulation of inner frictional resistance of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 211-216.
- [2] 刘汉龙,陶学俊,张建伟,等.水平荷载作用下PCC桩复合地基工作性状[J].岩土力学,2010,31(9):2716-2722.
LIU Hanlong, TAO Xuejun, ZHANG Jianwei, et al. Behavior of PCC pile composite foundation under lateral load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2716-2722.
- [3] 丁选明,刘汉龙,陈育民.《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规范》JGJ/T213—2010编制与说明[J].施工技术,2011,40(2):91-94,100.
DING Xuanming, LIU Hanlong, CHEN Yumin. Compilation and Explanation of Technical Specification for Composite Foundation of Cast-in-place Concrete Large-diameter Pipe Pile JGJ/T213-2010 [J]. Construction Technology, 2011, 40 (2) : 91-94, 100.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规范:JGJ/T213—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for composite foundation of cast-in-place concrete large-diameter pipe pile: JGJ/T 213-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [5] 张晓健.现浇混凝土薄壁管桩负摩阻力特性试验研究与分析[D].南京:河海大学,2006.
ZHANG Xiaojian. Test study on properties of negative skin friction of thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [6] 王国辉,周文龙.PHC管桩穿越软弱夹层桩身破损及施工对策[J].施工技术,2009,38(9):95-97.
WANG Guohui, ZHOU Wenlong. Damage of PHC pipe pile in penetrating Soft Soft interlayer and construction countermeasures [J]. Construction Technology, 2009, 38(9) : 95-97.
- [7] 马金铭.马来西亚槟城第二跨海大桥项目PHC桩沉桩质量问题预防措施与处置工艺[J].中国水运(下半月),2017,17(3):206-207,268.
MA Jinming. The prevention measures and treatment process of PHC pile sinking quality problems in the second cross-sea bridge project in Penang, Malaysia [J]. China Water Transport, 2017, 17(3): 206-207, 268.
- [8] 黄万山,朱岩,彭秀芳,等.某沿海滩涂风电场PHC桩沉桩问题研究[J].电力勘测设计,2019(3):70-75.
HUANG Wanshan, ZHU Yan, PENG Xiufang, et al. Research on PHC pile driving in a coastal shoal wind farm [J]. Electric Power Survey & Design, 2019(3) : 70-75.
- [9] 黄目升.浅析港口码头PHC桩沉桩施工技术应用[J].中国标准化,2018(2):142-144.
HUANG Musheng. Analysis of the application of PHC pile sinking construction technology in port wharf [J]. China Standardization, 2018(2) : 142-144.

- tion, 2018(2):142-144.
- [10] 蒋云花,胡欣. 预应力混凝土管桩在实例工程沉桩过程的断裂分析及处理[J]. 珠江水运, 2019(6):96-97.
JIANG Yunhua, HU Xin. The fracture of prestressed concrete pipe pile in the process of pile sinking in an engineering project [J]. Pearl River Water Transport, 2019(6):96-97.
- [11] 郑敏.PHC 桩静压沉桩垂直度偏差控制技术及纠偏措施研究[C]//人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 重庆, 2025:1320-1322.
ZHENG Min. Research on verticality deviation control technology and correction measures for static pressure pile driving of PHC piles[C]//Proceedings of the Academic Symposium on the Development of Artificial Intelligence and Economic Engineering.Chongqing, 2025:1320-1322.
- [12] 阮小峰. 水下摄像和高强灌浆在预应力管桩承载力不足处理中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(9):100-106.
RUAN Xiaofeng. Application of underwater photography and high strength grouting in the treatment of insufficient bearing capacity of prestressed pipe piles[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9):100-106.
- [13] 刘汉龙. 岩土工程技术创新方法与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1):34-58.
LIU Hanlong. Technological innovation methods and practices in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1):34-58.
- [14] 周云东,刘汉龙,李明生,等. 现浇薄壁管桩在威-乌高速公路软基加固中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(10):1671-1674.
ZHOU Yundong, LIU Hanlong, LI Mingsheng, et al. Application of cast-in-place thin-wall concrete piles to Wei-Wu highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10):1671-1674.
- [15] 张晓健,刘汉龙,高玉峰.PCC 桩芯土室内模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12):99-102.
ZHANG Xiaojian, LIU Hanlong, GAO Yufeng. Model test of inner soil of PCC pile [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12):99-102.
- [16] 陈亚东,陈思,于艳,等. 竖向受荷PCC 桩承载机制颗粒流数值模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(3):406-410.
CHEN Yadong, CHEN Si, YU Yan, et al. Particle flow code numerical simulation of bearing mechanism for PCC pile under vertical load[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(3):406-410.
- [17] 陈亚东,王旭东,余跃心,等. 竖向受荷PCC 桩宏细观工作性状研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7):1503-1510.
CHEN Yadong, WANG Xudong, SHE Yuexin, et al. Macroscopic and mesoscopic working performance of PCC pile subjected to vertical load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7):1503-1510.
- [18] 卢长娜,姜景山.PCC 桩复合地基桩土应力比的计算及影响因素分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(11):77-82.
LU Changna, JIANG Jingshan. Calculation and influencing factors of Pile-Soil stress ratio of PCC pile composite foundation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(11):77-82.
- [19] 谭慧明,刘芝平,丁选明. 加筋褥垫层对PCC 桩复合地基承载特性影响足尺试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(12):2531-2538.
TAN Huiming, LIU Zhiping, DING Xuanming. Full scale model test on effect of reinforced cushion on load transmission behavior of composite foundation of PCC piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(12):2531-2538.
- [20] 郑长杰,丁选明,刘汉龙,等. 饱和均质土中PCC 桩纵向振动响应简化解析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2):1087-1090.
ZHENG Changjie, DING Xuanming, LIU Hanlong, et al. Simplified analytical solution for vertical vibration of PCC piles in saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):1087-1090.
- [21] 李立辰,刘卓,刘浩,等. 考虑土塞效应的开口管桩沉桩与承载全过程离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7):1471-1480.
LI Lichen, LIU Zhuo, LIU Hao, et al. DEM analysis of installation and bearing process of open-ended piles considering plugging effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7):1471-1480.
- [22] 牛国生,王斐庆,刘兴. 沉管灌注桩竖向承载力研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(3):65-68, 81.
NIU Guosheng, WANG Feiqing, LIU Xing. Study on vertical bearing capacity of driven grouting pile [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(3):65-68, 81.
- [23] 张晓健,刘汉龙,费康,等. PCC 桩负摩阻力作用机理初探[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1):91-94.
ZHANG Xiaojian, LIU Hanlong, FEI Kang, et al. Study on mechanism for negative skin friction of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1):91-94.
- [24] 刘汉龙,张晓健. 负摩擦作用下PCC 桩沉降计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(7):1483-1486.
LIU Hanlong, ZHANG Xiaojian. Calculation of settlement of PCC pile subjected to negative skin friction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7):1483-1486.
- [25] 马露,王坤,陶思源,等. 基于有效应力法的单桩负摩阻力解析解[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5):79-86.
MA Lu, WANG Kun, TAO Siyuan, et al. Analytical solution for negative skin friction of single pile based on effective stress method [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2024, 51(5):79-86.
- [26] 邱相涛,方钊,袁聪,等. 西南丘陵地区新近深厚填土地基桩基负摩阻力特性研究[J]. 四川地质学报, 2025, 45(2):301-305.
QIU Xiangtao, FANG Zhao, YUAN Cong, et al. Research on the negative frictional resistance characteristics of pile foundations in newly deep fill sites in the hilly areas of southwest China [J]. Acta Geologica Sichuan, 2025, 45(2):301-305.
- [27] 贺占海,张志强,王杰亭,等. 软土地区后压浆灌注桩单桩承载力综合估算法研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(4):154-160.
HE Zhanhai, ZHANG Zhiqiang, WANG Jieting, et al. Comprehensive estimation research on the bearing capacity of post-grouting single bored pile in soft soil areas [J]. Drilling Engi-

- neering, 2025, 52(4):154-160.
- [28] 陈亚东,于艳,陆凡,等.密实砂土中竖向受压PCC桩端阻力计算方法研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):780-786.
CHEN Yadong, YU Yan, LU Fan, et al. The calculation method of tip resistance of PCC pile subjected to vertical compressive load in dense sand [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3):780-786.
- [29] 曹玉龙.南县至益阳高速公路软土地基PCC桩处理技术研究[J].黑龙江交通科技,2022,45(4):68-69,73.
CAO Yulong. Research on PCC pile treatment technology for soft soil foundation of Nanxian-Yiyang Expressway [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2022, 45(4):68-69,73.
- [30] 李伟,隋欣,李卫国,等.超薄型PCC桩在滩涂超软土地基处理工程中的实践[J].地基处理,2024,6(6):618-625.
LI Wei, SUI Xin, LI Weiguo, et al. Application of ultra-thin PCC pile in tidal ultra-soft soil foundation treatment project [J]. Ground Improvement, 2024, 6(6):618-625.
- [31] 孙炜,徐燕,胡天明.大直径深长桩泥岩侧摩阻力试验研究-以吉林省龙华松花江特大桥工程试桩为例[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):72-78.
SUN Wei, XU Yan, HU Tianming. Testing of skin friction of large diameter deep piles in mudstone: A case study of the test piles for the Songhua River large bridge in Jilin Province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):72-78.
- [32] 王延宁,王丰,张祥恒.小直径钢管灌注排桩在边坡抢险工程应用探讨[J].钻探工程,2022,49(4):152-157.
WANG Yanning, WANG Feng, ZHANG Xiangheng. Application of small diameter steel tube soldier piles in slope emergency works [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):152-157.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑桩基技术规范:JGJ 94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [34] 何筱进.现浇混凝土薄壁管桩水平承载性状试验研究[D].南京:河海大学,2004.
HE Xiaojin. Research on behaviour of cast-in-situ concrete thin wall pipe pile under lateral load [D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
- [35] 马志涛.水平荷载下桩基受力特性研究综述[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(5):546-551.
MA Zhitao. Study on behavior of pile foundation under lateral loading [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(5):546-551.
- [36] 马志涛,刘汉龙,张霆,等.现浇薄壁管桩水平受力特性试验研究[J].岩土力学,2006,27(S2):818-821,835.
MA Zhitao, LIU Hanlong, ZHANG Ting, et al. Behaviors of PCC pile under lateral loading test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2):818-821,835.
- [37] 刘汉龙,张建伟,彭劼.PCC桩水平承载特性足尺模型试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(2):161-165.
LIU Hanlong, ZHANG Jianwei, PENG Jie. Full-scale model tests on behavior of cast-in-place concrete pipe piles with large diameter under lateral loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2):161-165.
- [38] 张建伟,刘汉龙,陈育民.PCC桩水平承载特性足尺模型试验与数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2009,29(3):289-294.
ZHANG Jianwei, LIU Hanlong, CHEN Yumin. Full-Scale model test and numerical modeling for behavior of Cast-in-Place concrete large diameter pipe pile under lateral load [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3):289-294.
- [39] 张建伟,温森,孙兴亚,等.PCC桩与灌注桩的水平承载性能对比分析[J].河南大学学报(自然科学版),2010,40(5):533-536.
ZHANG Jianwei, WEN Sen, SUN Xingya, et al. Comparison analysis of the lateral bearing capacity of bored pile and PCC [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2010, 40(5):533-536.
- [40] 张建伟,刘汉龙.多层地基中PCC水平荷载桩的数值解[J].岩土力学,2010,31(5):1638-1644.
ZHANG Jianwei, LIU Hanlong. Numerical solution of laterally loaded cast-in-place concrete large diameter pipe pile installed in multi-layered soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5):1638-1644.
- [41] 张建伟,刘汉龙,丁选明.粘性土中PCC桩水平极限承载力的简化计算方法[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):33-36.
ZHANG Jianwei, LIU Hanlong, DING Xuanming. A simplified calculation method for ultimate bearing capacity of Cast-in-Place concrete pipe pile with large diameter in clay Soil [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4):33-36.
- [42] 周仕礼,丁选明,卢一为.复杂受荷条件下PCC桩承载特性研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(z1):107-112, 127.
ZHOU Shili, DING Xuanming, LU Yiwei. Study on bearing capacity of PCC pile under complicated load condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(z1):107-112, 127.
- [43] 华卫君.不同竖向荷载作用下桩基水平荷载试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):63-67.
HUA Weijun. Test research on horizontal load of pile foundation under different vertical loads [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(4):63-67.
- [44] 张红亮.现浇加筋大直径薄壁管桩(PCC桩)水平承载力试验研究[J].中国港湾建设,2018,38(10):48-51.
ZHANG Hongliang. Experimental study on lateral capacity on cast-in-place large diameter reinforced thin-wall pipe pile (PCC pile) [J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(10):48-51.
- [45] 丁阳波,王伟,徐炎冰,等.基于层次分析法的桩基水平承载力影响因素研究[J].电力勘察设计,2023,21(S2):123-128.
DING Yangbo, WANG Wei, XU Yanbing, et al. Study on influencing factors of horizontal bearing capacity of foundation pile based on Analytic Hierarchy Process [J]. Electric Power Survey & Design, 2023, 21(S2):123-128.
- [46] 杨三龙,郭严伟,万志辉,等.津潍高铁大直径预应力高强度混凝土管桩的水平承载性能[J].南京工业大学学报(自然科学

- 版), 2025, 47(4):412-421.
- YANG Sanlong, GUO Yanwei, WAN Zhihui, et al. Lateral bearing performance of large-diameter prestressed high-strength concrete pipe piles for the Tianjin-Weifang High-Speed Railway [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 47(4):412-421.
- [47] 陶学俊, 丁选明. 水平荷载作用下PCC桩群桩效应数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3):287-292.
- TAO Xuejun, DING Xuanming. Numerical analysis of PCC pile group effect under lateral load [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3):287-292.
- [48] 王振芳. 路堤下PCC桩复合地基群桩作用性状研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- WANG Zhenfang. Study on group effect of cast-in-situ concrete thin wall pipe pile composite foundation under road embankment[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [49] 韦立德, 杨春和, 徐卫亚, 等. 考虑饱和-非饱和渗流场和应力场耦合的三维强度折减有限元程序研制[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3):16-20.
- WEI Lide, YANG Chunhe, XU Weiya, et al. Development of the 3D finite element method of strength reduction considering the coupling of saturated-unsaturated seepage and stress [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3):16-20.
- [50] 张昕, 张茹梦, 刘晨, 等. 循环荷载作用下螺旋锚桩动力响应特性研究 [J/OL]. 岩土力学. (2025-08-26) [2025-09-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.16285/j.rsm.2025.0375>.
- ZHANG Xin, ZHANG Rumeng, LIU Chen, et al. Study on dynamic response characteristics of helical anchor piles under cyclic loads [J/OL]. Rock and Soil Mechanics. (2025-08-26) [2025-09-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.16285/j.rsm.2025.0375>.
- [51] 甘文爽, 谢雷雷, 朱勇, 等. 水泥土复合管桩抗拔设计的探讨 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(6):631-636.
- GAN Wenshuang, XIE Leilei, ZHU Yong, et al. Discussing on design of uplift pipe precast pile embedded in cement Soil [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(6):631-636.

(编辑 王跃伟)