

桩基工程理论研究与工程实践新进展 ——第十六届桩基工程学术会议综述

秋仁东^{1,2,3} 朱肇京^{1,2,3} 高文生^{1,2,3} 任鑫健^{1,2,3} 林 黎^{1,2,3} 孙 威^{1,2,3} 孟佳晖^{1,2,3}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建研地基基础工程有限责任公司, 北京 100013; 3. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

【摘要】 对“第十六届桩基工程学术会议”桩基工程理论研究与工程实践进展进行综述, 内容包括大会特邀报告、理论与试验研究、桩基设计研究与实践、桩基施工技术与管理、桩基检测技术 5 个方面。理论与试验研究涉及专题有: 广东地质条件下桩基工程相关问题研究, 地层温度对桩基承载力与使用性能影响的试验研究, 特殊条件下桩基承载性状的试验研究, 复合桩承载性能的理论研究与试验研究, 桩基动力与振动台试验研究, 压桩方案对压桩施工参数影响的试验研究。桩基设计研究与实践涉及的专题有: 桩基设计对桩侧和桩端阻力取值的研究, 桩基在地基基础加固中的应用研究, 海洋欠固结土层中桩基设计的研究, 人工智能技术在桩基设计方面的实践, 桩基设计中方案优化研究, 风电项目中桩基设计进展。桩基施工技术与管理涉及专题有: 静钻根植桩的施工环境效应, 特殊地层中成桩施工的环境效应, 低净空下桩基施工技术, 盾构施工对既有建(构)筑物桩基变形的影响, 人工智能在桩基施工中的应用, 桩基后注浆工艺的探讨。桩基检测技术涉及的专题有: 桩身完整性检测方法的探讨, 桩基检测新技术的探讨, 桩基检测理论研究的探讨, 预制桩检测技术探讨。

【关键词】 第十六届桩基工程学术会议; 桩基工程; 设计; 试验; 施工; 施工环境效应; 检测

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0603

Theoretical research and new advances in pile foundation engineering: a review of the 16th Pile Foundation Engineering Academic Conference

QIU Rendong^{1,2,3} ZHU Zhaojing^{1,2,3} GAO Wensheng^{1,2,3} REN Xinjian^{1,2,3}

LIN Li^{1,2,3} SUN Wei^{1,2,3} MENG Jiahui^{1,2,3}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. China Academy of Building Research Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

【Abstract】 This paper provides a comprehensive review of the advances in theoretical research and engineering practice of pile foundation engineering, as presented at the 16th Pile Foundation Engineering Academic Conference. The review encompasses five main aspects: keynote speeches, theoretical and experimental research, pile foundation design research and practice, pile construction techniques and environmental effects, and pile testing technologies. The topics covered under theoretical and experimental research include: pile foundation issues specific to the geological conditions in Guangdong Province; experimental studies on the effects of ground temperature on pile bearing capacity and serviceability; experimental investigations into pile bearing behavior under special conditions; theoretical and experimental studies on the load-bearing performance of composite piles; dynamic and shaking table tests for pile foundations; and experimental studies on the effects of jacking schemes on pile jacking construction parameters. Research and practice in pile foundation design focus on: determining side and end resistances in pile design; applications of pile foundations in ground and foundation reinforcement; pile design in marine under-consolidated soil layers; practical applications of artificial intelligence (AI) in pile design; optimization of pile foundation design schemes; and recent advances in pile design for wind power projects. Topics regarding pile construction techniques and environmental effects involve: environmental impacts of static drilling and root-planting piles; environmental effects of pile installation in special geological strata; pile construction techniques in low-headroom conditions; impacts of shield tunneling on the deformation of existing adjacent piles; applications of AI in pile construction; and discussions on post-grouting techniques for pile foundations. Finally, the pile testing technologies section covers: evaluation of pile integrity testing methods; explor-

ation of novel pile testing technologies; theoretical research in pile testing; and testing techniques for precast piles.

【Key words】 16th Pile Foundation Engineering Academic Conference; pile foundation engineering; design; testing; construction; construction environmental effects; inspection

0 前言

第十六届桩基工程学术会议于2025年11月24日—26日在深圳举行。该会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会及建筑安全与环境国家重点实验室共同主办,承办单位为深圳市勘察测绘院(集团)有限公司。会议共收到来自137家单位的有效投稿114篇,涵盖23所高校、114家科研院所及企业。经由会议学术委员会严格评审筛选,本次大会共录用论文77篇。论文研究内容覆盖了桩基工程基本理论与试验研究、工程优化设计与实践应用、施工方法与工艺改进、地基加固技术应用、新型材料与工艺研发、现场检测、监测与变形预测、典型工程案例、人工智能技术交叉应用、行业技术标准探讨等多个热点与前沿方向,全面反映了该领域近阶段的研究动态与技术突破。

本届大会共设置了4个分会场:会场一主题为理论与实验研究、质量提升与监测;会场二主题为新技术、新工艺、新材料;会场三主题为现代化城市更新;会场四主题为大湾区创新成果。除此之外,会议还设立了青年学者、学子交流专场。依托深圳地处粤港澳大湾区的区位优势,本次会议特别设立“大湾区创新成果展”与“大湾区创新技术成果交流专场”,为与会代表提供全方位、多层次、重实效的学术与技术交流体验。

本文按照会议内容分为5个部分来介绍,第一部分是大会开幕式特邀报告,第二部分是理论与试验研究,第三部分是桩基设计研究与实践,第四部分是桩基施工技术与施工环境效应,第五部分是桩基检测技术。

1 大会特邀报告

陈湘生阐释了基于新技术的三维地质建模-物联网-深度学习-扩展现实的岩土工程智能化转型方法,介绍了建筑信息模型(BIM)与地理信息系统(GIS)一体化的三维地质建模、“端-边-云-网”的技术架构、以主动伺服加载系统为代表的岩土工程风险主动控制系统,分享了物联网传感器技术在岩土工程领域的应用情况以及虚拟现实与增强现实技术在岩土工程领域的应用现状,并且分析了人工智能(深度学习)在岩土工程风险预测及预警方面的关键作用^[1]。

岳清瑞围绕城市建筑与基础设施安全领域的关键问题,深入探讨了天空地一体化监测预警技术的发展与应用。报告首先剖析了新发展阶段城市安全呈现的新特征、动态变化与亟待解决的核心需求,随后系统阐释了天基、空基、地基一体化监测体系的构建思路,跨尺度协同监测的作用机理与关键技术,以及当前阶段关注城市安全的必要性和发展新技术的重要性。报告认为,建立城市全域联动、立体高效天空地一体化监测预警技术体系,从卫星遥感、无人机巡检、摄像头及暗光细观等方面实现对城市安全的立体覆盖以及感知互补的协同融合,可以更好地提升城市安全和治理效能,解决城市安全风险,从而达到可持续发展的目标^[2]。

王卫东介绍了植桩技术,该技术采用水泥土或者固化剂等其他材料先形成一个外桩,然后将高强预制桩插入到外桩中,形成外面有水泥土或者其他固化剂包裹的复合桩体。由于该技术采用搅拌先成孔,避免了挤土或者噪声,同时又具有预制桩的优点。植桩技术将成为桩基技术工程发展的一个非常重要的方向^[3]。

丘建金介绍了深圳地区地下室抗浮的若干问题,认为场地抗浮设防水位与基底浮力是两个既相互关联又边界清晰的研究范畴,二者不能混为一谈,需采用差异化的理论方法分别开展研究。其中,抗浮设防水位的确定主要受区域水文地质背景、地下水补径排条件的控制,其研究应建立在水文地质学理论之上;而基底浮力的计算与分析,则需以有效应力原理和地下水渗流理论为基础,结合水力学与地下水动力学方法进行推导^[4]。

高文生介绍了《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)修订的相关事宜,本次修订内容包括:(1)对变刚度调平设计原则进行了细化;(2)对桩基负摩阻力计算方法进行了补充;(3)对嵌岩桩承载力计算内容进行了调整;(4)对超长灌注桩设计、施工、检测的相关内容进行了修改调整;(5)增加了群桩水平位移简化计算方法;(6)增加了考虑侧阻概化和沉降计算深度范围内附加应力均化的应用 Mindlin 解计算桩基沉降方法;(7)增加了桩基抗震1节;(8)增加了灌注桩扩底施工内容^[5]。

陈凡介绍了基桩动力荷载试验的理论体系,

报告中指出,与传统的承载力计算方法(利用桩顶实测的激励和响应信号进行的桩-土相互作用分析)相比,锤作为新增分析维度,其运动状态、受力变化和能量传递效率也在计算考虑之列,体现了锤-桩-土整个力学系统的相互作用。除桩顶的激励和响应是可测量外,锤作为刚体时其运动状态也是可测量的。为使计算公式和方法能与概念的阐述在波动理论体系下得到闭合,开展了以下四方面的工作:(1)引入锤芯的动量和动能测试参数,将传统的基于实测信号的桩-土相互作用数值计算分析拓展至锤-桩-土相互作用分析;(2)通过理论推导和简化计算模型的模拟验证,建立打桩岩土阻力发挥、桩身受力和运动计算的统一公式,使长持续和短持续两种动力载荷试验在一个理论体系下实现融合,以消除两种试验方法由于原理上的抵触而造成对各自发展的制约;(3)提出了完全基于波动理论的承载力分析方法——延时法,以规避既往方法在承载力计算建模时需要引入经验土参数而导致的结果随意性;(4)搜集现场原型桩对比试验数据,为不同计算方法原理性分析论证提供对比和验证^[6]。

2 理论与试验研究

2.1 广东地质条件下桩基工程相关问题研究

温勇等^[7]针对广东地区特殊的工程地质条件与桩基工程应用现状,深入剖析了该领域亟待明确的技术要点:(1)岩石地层桩基承载力较高,根据广州地区早期挖孔桩桩底压板载荷试验的工程数据,基于岩石单轴抗压强度经验折减确定桩端承载力的方法,虽为经验性方法,但在工程应用中偏于安全;(2)对于含强风化夹层的岩体,强风化层是控制持力层稳定性的关键软弱层,因此应根据强风化夹层的强度与变形参数来确定持力层的合理厚度;(3)成桩工艺对桩侧摩阻力影响显著,挤土桩的侧摩阻力明显大于挖孔桩,尽管其作用机理已基本清晰,但理论计算精度仍难以满足工程要求,现阶段仍以经验法为主;(4)随着数值计算技术的发展,侧向受荷桩的计算应逐步转向基于本构模型的数值分析方法,切线模量法因兼具理论基础与实用性,值得进一步推广与完善;(5)中性点位置是桩负摩阻力计算的核心参数,计算时必须综合考虑土体的受荷变形规律,单纯依赖软土层厚度和持力层类型的简化方法不够严谨;(6)端承桩的沉降变形较小,设计以承载力控制为主,广东省地基规范推荐的基于布辛尼斯克解、采用变形模量的沉降计算方法,具有简便可靠的工程优势。

余小龙等^[8]探讨了珠海地区花岗岩风化土层的

工程特性对摩擦桩承载力的影响。以珠海某宿舍楼改造项目为例,基于4根后注浆微型钢管桩的抗压静载试验结果,分析了实测值远低于规范计算值的原因,并进行了计算验证。珠海地区多个项目的工程实践经验表明,花岗岩风化土在湿化甚至浸水后,土体内部的胶结作用会显著削弱,容易软化崩解成泥状,若注浆施工控制不当,桩侧摩阻力将进一步降低,导致实际工程实测值与理论设计值存在较大差异。

2.2 地层温度对桩基承载力与使用性能影响的试验研究

王子逸等^[9]基于桩-土位移协调非线性荷载传递函数模型,研究了循环温度变化对能源桩侧阻力分布及其演化的影响,构建了能反映长期温度循环效应的能源桩-土荷载传递模型。通过桩基荷载传递位移协调法,改进并获得了考虑循环温度效应的能源桩桩身轴力和侧阻力响应的计算方法。依托昆山能源桩现场测试数据,验证了荷载传递模型的可行性,并深入分析了温度循环对桩基承载性能的影响。研究结果显示:在冷热循环作用下,能源桩会出现附加沉降;随着循环次数的增加,能源桩的各项力学响应均会发生变化,并最终趋于稳定;同时,随着荷载水平的提高,循环温度对能源桩基承载性能的影响逐渐减弱。

潘文曜等^[10]深入研究了管桩混凝土在硫酸盐环境中的腐蚀行为,通过在不同温度及循环侵蚀条件下的室内试验,并结合微观测试手段,揭示了其腐蚀机理。研究结果显示,温度的升高会显著加剧管桩混凝土的硫酸盐侵蚀程度。在60℃环境下经过120d后,管桩外层混凝土的强度保持率为93.1%,内层混凝土的强度保持率为91.4%,均高于普通混凝土的89.1%。微观分析发现,高温促进了钙矾石和石膏等膨胀性产物的形成,这些产物富集后引发了微裂缝,但管桩离心混凝土微裂缝的数量明显少于对比混凝土。干湿循环试验结果表明,经过120次循环后,管桩外侧和内侧混凝土的强度保持率分别为95.7%和93.3%,显著高于普通混凝土的90.9%。管桩混凝土外层具有极低的孔隙率(2.69%)和有害孔比例(1.24%),这为其优异的抗硫酸盐侵蚀性能提供了坚实的结构基础。

2.3 特殊条件下桩基承载性状的试验研究

陈俊杰等^[11]为研究大直径管桩贯入黏土时的超孔隙水压力变化,利用ABAQUS有限元软件进行数值建模,对不同抗剪强度(不排水)的土体进行数值模拟和分析。结果表明,土体强度越大,产生的超孔隙水压力幅值也越大,管桩贯入扰动引起的桩外侧超孔

隙水压力会更快地衰减。

杨红坡等^[12]以深圳坪山地区风化砂岩地层为研究背景,为揭示后注浆技术对灌注桩竖向承载力与沉降特性的作用机制,并确定适用于该地层的最优注浆参数,选取4根同条件旋挖灌注桩开展对比静载试验,其中2根采用桩端桩侧联合注浆工艺,另外2根作为未注浆对照组。试验数据分析表明:后注浆技术对风化砂岩地层灌注桩的加固效果显著,注浆后桩的竖向承载力较未注浆桩实测极限承载力提高约1倍;在相同荷载条件(未注浆桩极限荷载)下,注浆桩的沉降量仅为未注浆桩的16.4%~29.4%,沉降控制效果显著。

为探究玄武岩纤维对搅拌水泥桩桩体受力性能的改性规律,陈必光等^[13]设计了系统的室内力学试验,通过抗压、直剪和劈裂抗拉3种试验方法,定量研究了纤维掺量、纤维长度及养护龄期3个因素对纤维水泥土力学特性的影响。结果表明:(1)纤维水泥土的抗压变形过程可分为孔隙压密、弹性变形与孔隙压缩协同发展、弹塑性变形与微损伤演化、宏观破坏4个阶段;玄武岩纤维的加入显著提高了水泥土的抗压强度,在纤维掺量0.6%、长度6 mm的组合条件下,抗压强度提升幅度最大。(2)抗剪应力-应变曲线表现为弹性变形、弹性强化和剪切破坏3个阶段;纤维掺量0.6%时,水泥土的抗剪强度和内摩擦角达到峰值;纤维长度18 mm时,水泥土的抗剪强度和黏聚力指标最优。(3)劈裂抗拉应力-应变曲线包含弹性变形、脆性破坏、残余强度和轻度稳定4个阶段;最优抗拉强度对应的纤维参数为掺量0.6%、长度6 mm;此外,玄武岩纤维水泥土的拉压比普遍高于普通水泥土,表明其韧性得到了有效改善。

2.4 桩基动力与振动台试验研究

邱明兵等^[14]根据成层土振动台试验的复合地基桩身应变数据形态和数值,反演了砂土和淤泥质黏土的动力弹簧刚度,并得出了以下结论:(1)双弹簧反应位移法在桩基抗震分析中的应用结果表明,该方法计算所得的桩身位移曲线、最大位移以及弯矩曲线、弯矩极值均与实测数据吻合良好,验证了其在该领域的适用性与准确性,为桩基抗震分析提供了一种新的技术手段。(2)振动台试验数据显示,桩身位移与对应位置的土层位移具有高度一致性,基于此,可通过测试土层位移来估算桩身位移,因此振动台试验应将位移形态的测试作为核心研究内容。(3)基于试验数据,采用双弹簧反应位移法反演得到砂土和淤泥质软土的地基动力刚度分别为180 MPa/m和5~8 MPa/m,

上述参数可作为同类地质条件下桩基抗震设计的参考值。(4)对比分析发现,砂土的动力刚度约为静力刚度的6倍,而淤泥质软土的动力刚度与静力刚度相差不大,即呈现硬土动力刚度高于静力刚度数倍而软土动力刚度与静力刚度相近的规律,此规律仍需更多系统性试验数据予以验证。

张聪等^[15]为研究强震区近断层(活动断层)桥梁桩基础的时程响应特性,开展了振动台试验,选取不同种类的地震动峰值加速度的人工合成5010波(50年超越概率10%),围绕不同地震动峰值加速度工况,系统探讨了桩基关键力学响应指标及时程特性,包括桩顶与桩底加速度的时程变化、桩顶位移的时程演化规律、桩身弯矩的时程分布特征,并深入研究了对应工况下桩基的损伤形态与损伤程度。试验结果显示:在不同地震动峰值加速度影响下,桩顶加速度最大值的出现时刻明显滞后于桩底,滞后时间最长可达2.45 s;桩顶水平方向位移最大值随地震动加速度峰值的增加而逐渐增大,且水平位移较早达到最大值;桩基础桩身弯矩最大值亦逐渐增大;桩身弯矩沿深度方向呈现出双峰分布,峰值位置分别位于软硬土过渡带及土岩过渡区;当地震动峰值加速度超过0.40g时,桩基基频显著下降,桩基础出现损伤迹象。在强震作用下,断层发育区(活动断层)桩基础的抗震设计可考虑采用桩身弯矩与桩顶位移双参数控制指标,以确保桩基具备足够的抗震能力。

2.5 压桩方案对压桩施工参数影响的试验研究

为探究压桩速率和插桩时间间隔对劲性复合桩压桩力曲线的影响规律,何赛等^[16]开展了不同插桩时间间隔(1, 2, 4, 6, 8 h)下水泥土桩的压桩试验,压桩速率设定为10~400 mm/min。通过万能试验机监测压桩力和位移,分析压桩力曲线的形态特征及关键参数。结果表明:压桩速率越大,土塞高度和桩端阻力越小;桩内侧摩阻力是制约压桩力的主要因素;插桩时间间隔越长,水泥土流动性越弱,越易挤进管芯,土塞效应越强,压桩力越大。该研究结果为劲性复合桩施工参数的优化提供了理论依据。

3 桩基设计研究与实践

3.1 桩侧和桩端阻力设计取值研究

杨立等^[17]明确了嵌岩桩桩端岩体处于三向应力状态下的荷载传递规律、破坏模式和承载特性,介绍了几种不同于现行规范的桩基承载力计算方法,列举了近年的工程实测数据、模型试验成果、数值模拟、原位试验结果。综合现场试验和模型试验成果,软岩的端阻力特征值能达到单轴抗压强度的0.5~

1.26 倍;侧阻力能达到单轴抗压强度的 0.1 ~ 0.55 倍。研究表明,现行嵌岩桩承载力计算公式偏保守,桩端阻力计算应考虑桩端实际的三向受力情况,尤其对软岩可提高承载力计算系数,得到更接近实际的单桩承载力特征值。对于勘察、设计和检测规范在嵌岩桩桩端岩石强度代表值上不统一的情况,建议基于实测数据进行统一。

在桩基施工过程中,受成孔工艺的影响,桩侧摩阻力变化较大,尤其是泥浆护壁成孔灌注桩,其桩侧摩阻力的取值仍存在一定争议。王翔等^[18]以深圳前海风化深槽区域厚层花岗岩风化带泥浆护壁成孔灌注桩工程案例为背景,在勘察期间采用标准贯入试验对风化带进行细化分层,试桩验收采用双荷载箱自平衡法对基桩进行静载试验,测得基桩在压浆前后各深度段的桩侧摩阻力。将测得的各风化层压浆前后的侧摩阻力与规范取值进行对比分析,提出花岗岩各风化层泥浆护壁成孔灌注桩侧摩阻力的取值建议。为更准确地反映侧摩阻力受施工工艺影响的程度,在对工程案例实测数据进行深入分析后,建议桩侧摩阻力取值在规范建议值的基础上进行适当折减,折减系数可取 0.5 ~ 0.7,具体取值应视泥浆密度、成孔时间及土层埋深等因素而定,当泥浆密度大、成孔时间长、土层埋深大时取低值,反之则取高值。

3.2 桩基在地基基础加固中的应用研究

乔丽平等^[19]以某旋喷桩复合地基加固工程为研究背景,对该工程旋喷桩质量问题及其成因进行了全面分析,阐述了预应力 PHC 管桩补强加固的技术路线和实际效果。研究表明:(1)地层中的有机质含量会显著影响旋喷桩和搅拌桩的成桩质量,方案设计时应予以重点考虑。(2)旋喷桩施工前必须进行工艺性试验,通过试验确定最优施工参数;复喷工艺是提高旋喷桩施工质量、改善成桩效果的有效手段。(3)PHC 管桩与旋喷桩组成的刚-柔组合桩复合地基,能够充分利用 PHC 管桩的高承载力特性提高复合地基的承载性能,使整体地基承载力得到大幅提升。

周圣斌等^[20]针对某框架结构、独立柱基+防水板裙楼柱下基桩承载力不满足设计要求的情形,将原有的防水板调整为具有一定厚度的梁板式筏基,形成承台桩+承台间筏板的复合基础形式,共同承担上部结构荷载,从而使裙楼区域在桩土协同作用下的承载力满足上部结构要求。

3.3 海洋欠固结土层中桩基设计的研究

李元曦等^[21]结合桩基设计参数,利用等应变速率(CRS)固结仪器,研究了欠固结土的原状土和重塑

土的压缩曲线关系,探讨了不同扰动情况下重塑土与原状土压缩曲线的联系。研究表明,海洋桩基工程质量评价中, $\Delta e/e_0$ 评价方法不适用于欠固结土体样本。通过对固结特性与桩基设计参数进行分析,发现原状欠固结土相较于重塑土具有较大的前期固结压力 P_c 、再压缩系数 C_r 和回弹系数 C_s 。当竖向压缩荷载增至 $0.55e_0$ 时,原状土与重塑土的 $e-p$ 压缩曲线基本重合,此时土体结构性扰动对其压缩变形特性的影响已基本消失,二者均表现出正常固结土的典型压缩曲线特征。

3.4 人工智能技术在桩基设计领域的应用

针对传统桩基设计方法存在的岩土参数取值保守、优化维度单一、人工试算效率低下等问题,康旭云等^[22]提出了一套融合三维地质建模与多变量智能优化的桩基设计新方法。该方法通过智能解析岩土工程勘察报告,构建高精度三维地质模型,实现地层空间连续性表达与结构构件的精准匹配。创新性地提出了“桩周四象限分析法”,自动匹配邻近钻孔,实现参数精细化取值。同时,开发了多变量智能优化引擎,同步迭代桩径、桩长、配筋及嵌岩条件等参数,结合造价目标函数与规范约束库(国标、地标),利用 AI 优化算法与知识图谱规则,实现全局最优解搜索。工程应用结果显示:在某水厂项目中,节约造价 817 万元(优化率 19.8%);在某商住项目中,节省成本 297 万元(优化率 12.5%)。该系统为复杂场地桩基设计提供了安全、经济、高效的解决方案。

3.5 桩基设计方案优化研究

谢宏丽等^[23]依托 PRC 管桩现场静载试验结果,借助 ABAQUS 建立了不同桩长、桩径的有限元模型,并将不同工况下的单桩竖向极限承载力与现场试桩方案进行对比,得到合适的桩基优化方案。研究表明,桩长是影响管桩承载性能的关键因素之一,在特定地质条件下对承载力具有显著影响,但对其作用效果需结合桩径、地层特性等多方面因素进行综合考量。

为应对当前城市化进程中复杂地质条件超高层建筑地基基础设计所面临的挑战,夏庆鹏等^[24]通过优化搅拌植桩的桩型、设计参数及施工工艺,提升搅拌植桩在复杂地质条件下的适应性,以确保超高层建筑的结构安全与地基稳定。从经济效益角度出发,优化桩基础方案设计可降低工程造价,缩短施工周期,提升工程的整体性价比。研究进一步验证了搅拌植桩方案在实际工程中的有效性和可靠性。所形成的“地质适配型”桩基设计体系为复杂地质条件超高层

建筑地基基础设计提供了新的技术路径,其多目标优化方法对推动绿色建造技术的发展具有重要参考价值。

3.6 风电项目中桩基设计进展

风力发电设备对地基承载力和整体稳定性的要求较高,一般情况下天然地基难以满足设计需求,通常采用桩基方案。李强等^[25]对多个风电项目的桩基础设计进行了系统整理,并以某在建项目为例,针对其粉砂与粉质黏土层互层的地质条件,对内芯采用预应力管桩、外芯采用水泥土搅拌桩的劲性复合桩进行了多方案设计比选。通过比较不同桩型在承载力、施工进度、沉降控制和经济性方面的表现,揭示了劲性复合桩的优势和特性,并详细介绍了该项目风电机组桩基础的设计过程。结合此项目,对劲性复合桩的机理、特性及影响因素进行了剖析,总结了施工过程中遇到的问题及相应的处理措施,并提出了优化建议和构想,为类似条件的风电项目基础设计提供了参考和借鉴。

4 桩基施工技术与施工环境效应

4.1 静钻根植桩的施工环境效应

为系统地分析静钻根植桩在施工过程中对周边土体产生的环境影响,王迪等^[26]依托宁波和上海两地的工程实践,借助测斜仪、分层沉降仪及土压力传感器,对静钻根植桩施工全周期内土体的位移变化与应力响应进行了量化分析。研究表明:(1)单桩施工采用起重机自重植桩工艺时,表现出显著的非挤土特性,桩周土体未出现隆起现象,但存在轻微的缩径倾向,最大水平位移随与桩体距离的增加而减小,8 m 以外的环境影响基本可忽略。(2)群桩施工对 8 倍桩径距离处的土体应力扰动不超过 10 kPa,深层水平位移峰值约为 1.5 mm,施工速度和群桩密度是关键影响因素。(3)提前进行基坑围护能有效控制 6 m 范围内土体的应力与侧向位移,变形响应的降低幅度十分显著。本研究充分验证了静钻根植桩的环境友好性,为绿色桩基施工技术的优化升级提供了理论支撑和工程实践指导。

胡光阳等^[27]依托 G9221 杭甬高速宁波三期工程的静钻根植桩试桩施工,通过振动、噪声与深层土体水平位移等多参数监测,研究了该桩型施工对周边环境的影响。研究结果显示:在距离试桩净距 10 m 的位置,静钻根植桩施工引发的振动速度峰值为 0.031 cm/s,仅为旋挖钻孔灌注桩的十分之一,低于大型车辆行驶对道路产生的振动;施工过程中的噪声水平约为 65 dB,相较于施工前增加了 6~7 dB;施工过程中测得的深层土体最大水平位移值为 1.84 mm,且位移

方向均指向桩体内部。测试结果表明静钻根植桩在施工过程中基本不会产生挤土效应,引发的振动和噪声均符合国家标准的容许值。该研究成果可为类似项目的静钻根植桩施工提供参考。

4.2 特殊地层成桩施工的环境效应

预应力管桩因其施工速度快、成桩质量可控、工程造价低等显著优势,在工程领域得到了广泛应用。然而,在复杂地质条件下,尤其是沿海城市海陆交互沉积层的软土地场,深厚淤泥层呈现出含水量高、孔隙比大、压缩性高、承载力低、抗剪强度低、灵敏度高特性。建设单位往往出于缩短开发周期、节省工程造价的考虑,在桩基施工前未对该类场地进行地基处理,导致预应力管桩基础质量事故频发。珠海某厂房采用预应力管桩基础,因基坑与承台土方开挖施工不规范,导致已开挖区域内所有工程桩发生整体偏位。易恒等^[28]以该工程为研究对象,通过综合采用整体抬升承台底标高、增补工程桩、接桩处理以及优化土方开挖施工方案等一系列技术措施,有效地解决了此类桩体偏位问题,取得理想的工程治理效果。

旋挖灌注桩在超厚软土地质条件下的应用日益广泛,但其桩底沉渣过厚已成为突出的质量问题。桑昊旻等^[29]以深合区工程实例为切入点,围绕旋挖灌注桩钻孔、钢筋笼吊放、二次清孔和混凝土浇筑等关键工序,分析了桩底沉渣过厚的原因,提出了相应的质量控制措施,建议结合地质条件、施工难度与成本要求,简化施工操作流程,严格控制桩底沉渣厚度,以确保灌注桩成桩质量。

4.3 低净空下桩基施工技术

随着中国经济的快速发展和城市更新进程的持续推进,公路铁路隧道、轨道交通、地下综合体以及既有建筑物的加固改造等项目对施工设备性能提出了新的要求。面对诸多狭小空间内的桩基施工、地基加固和补强问题,传统机械设备已无法满足实际施工需求,供需矛盾愈发凸显。为适应复杂多变的应用场景和多工艺施工的要求,尤其是满足狭小空间低净空的特殊条件,盛志战等^[30]成功研制了桅杆可伸缩式低净空多功能钻机。设备研发完成后,在前门地下城托换改造项目中成功完成了狭小空间护坡、地下城加固托换桩、抗拔桩的施工任务,并根据实际应用反馈对设备进行了优化改进。实际工程应用充分验证了该钻机的实用价值,为狭小空间岩土行业的高质量发展提供了技术装备支撑。

梁尧祥等^[31]针对常规旧桩清除方法在高架桥下受限的问题,提出了高架桥下盾构穿越段低净空条件

下废旧灌注桩拆除与桥基防护综合施工技术。结合广州市南沙港快速梁板式桩基清除工程的实际案例,介绍了该技术的实际应用情况和效果。该技术主要依托履带式全套管全回转钻机,配合低净空专用配套设备,依次进行套管沉入、冲抓取土、扭断旧桩、起拔断桩、冲砸残桩等工序,实现了对废旧灌注桩的分段清除。该技术成功解决了低净空受限条件下的旧桩清除施工难题,并通过桥基综合保护措施,尽可能减少施工对现有建筑的影响,达到了高效、低扰、可靠的效果,为类似地下隧道盾构工程施工提供了成套的解决方案。

雷 斌等^[32]针对桥下盾构穿越区隔离桩施工受限的难题,创新性地采用了低净空全回转一体机技术。该技术通过将短节永久性护筒逐节沉入预定位置后,利用低净空泵吸反循环回转钻机在护筒内进行钻进排渣,钻孔完成后安放短节钢筋笼和导管,完成混凝土灌注成桩。凭借全回转一体机与反循环回转钻机的协同作业,解决了超低净空条件下的灌注桩成桩难题,并有效避免了对既有桥墩的扰动,为类似地下隧道盾构工程施工提供了系统化的解决方案。

4.4 盾构施工对既有建(构)筑物桩基变形的影响

为了分析盾构隧道切削既有建筑物基桩后的建筑物和地表沉降情况,并探究所采取加固措施的变形控制效果,刘 动等^[33]以深圳轨道交通某盾构工程为依托,研究了盾构直接切削既有建筑物管桩基础的变形控制方法。第三方监测数据与工程实施效果表明,采取对既有建筑物基础注浆加固、房屋结构补强加固后,建筑物沉降、管片竖向沉降、管片净空收敛及拱顶下沉等指标均基本满足变形控制要求。现场实施注浆加固后,地表沉降趋于稳定,盾构隧道得以顺利贯通。

4.5 人工智能在桩基施工中的应用

预应力高强混凝土管桩(PHC管桩)的接头质量是确保桩基竖向和水平承载性能的关键因素。杨 军等^[34]分析了机械接桩和焊接接桩两种施工技术在实际应用中所面临的难题,针对预制管桩人工焊接劳动强度高、焊接质量不稳定等突出问题,开发了PHC管桩机器人智能焊接接桩技术及其配套设备。基于对PHC管桩施工设备及现场条件的深入调研,先后研制出单焊枪、双焊枪、履带自行式以及适用于狭窄空间的管桩自动焊接设备,并在实际工程中开展了PHC管桩自动焊接接桩技术的应用研究。应用结果显示,PHC管桩智能焊接技术在保障管桩连接质量和提升施工效率方面表现出显著优势,具备广阔的应

用前景。

4.6 桩基后注浆工艺的探讨

在建筑工程桩基施工领域,提升基桩承载力和稳定性一直是关键技术目标。桩端加载复合式后注浆技术凭借其独特的工艺原理,成为解决这一问题的有效途径。其中,加载盒作为该技术的核心装置,其性能和应用效果直接决定了技术的实施成效。王双双^[35]围绕加载盒的结构设计、工作原理、技术优势、施工工艺及工程应用等方面展开系统研究,通过理论分析与实践验证相结合的方法,深入探讨加载盒在增强桩基性能、优化施工工艺及降低工程成本等方面的作用机制,为该技术在建筑工程中的广泛应用提供理论支持与实践参考。

桩端后注浆预制桩是一种新型工艺,承载力较常规预制桩显著提升,其承载力特征值可达桩身承载力的90%。庞作会^[36]对该桩型承载力的保障条件开展研究,明确影响因素主要包括持力层工程特性、桩端进入持力层深度以及注浆水泥用量等。研究团队先后在太原旭辉尖草坪项目和上海军工路快速路项目中进行了工程试验,并在上海浦东新区某二期项目中进行了工程应用。工程试验和应用结果表明,对于桩径为600 mm的管桩,要确保承载力特征值达到3500 kN,需满足以下条件:持力层选用砂土,且其极限端阻力标准值达到5000 kPa,桩端进入持力层的深度不小于2.5 m,后注浆水泥用量需在2.0 t以上。

5 桩基检测技术

5.1 桩身完整性检测方法的探讨

杨嘉仪等^[37]以混凝土灌注桩完整性检测为研究对象,针对声波透射法在工程应用中可靠性验证不足的问题,依托实际工程案例,开展了声波透射法与钻芯法的系统性对比研究。通过采集桩身剖面的声速、波幅及PSD(声时-波幅)参数,结合钻芯法获取的缺陷位置和类型数据开展对比分析。研究结果表明,声波透射法能够精准定位桩身缺陷区域。该研究成果不仅证实了声波透射法在灌注桩完整性检测中的有效性,还为该技术的工程应用提供了量化分析依据和优化策略,对提升桩基质量检测的效率与准确性具有重要参考价值。

李学文等^[38]阐述了基桩完整性检测方法-管波法的检测原理,并通过多个应用实例展示了其在预制管桩桩身完整性检测方面的显著效果。应用结果表明,管波法在管桩桩身缺陷检测方面表现出优异的性能,尤其适用于多节拼接管桩、超长管桩,以及采用低应变法检测时桩底反射信号不清晰的桩体。该方

法对桩身缺陷的识别能力不受缺陷埋深的限制,可实现对管桩完整性的全覆盖检测。

5.2 桩基检测新技术的探讨

混凝土灌注桩在建筑工程中应用广泛,其质量检测至关重要。钻芯法与孔内摄像法相结合虽能有效检测灌注桩质量,但孔内清洁度会严重影响检测的准确性,而传统清孔技术存在诸多不足。王光辉等^[39]设计了一种集成机械刷洗、高压冲刷、密封压排一体化的复合技术装置,该装置能彻底清洗钻芯孔孔壁,并以机械胀压方式实现孔口密封,利用压缩空气将孔内浊水彻底排出。经深圳市多个工程项目实践验证,该技术不仅能大幅提升检测效率与质量,还能降低设备材料成本,缩短工期,并避免检测失败带来的潜在损失,在桩基检测领域具有广阔的推广应用前景。

油压式荷载箱作为加力设备已广泛应用于桩基竖向承载力自平衡静载试验。吴江等^[40]提出将该设备用作测力装置安装在桩顶或桩底,将普通桩改造为智能监测控制桩,能够自动有效感知上部结构荷载和桩周岩土力学性能,可服务于施工、运维、检测及监测全过程。其耐久性和应用范围均优于电阻应变式传感器、振弦式传感器、滑动测微计及光纤式应变传感器等常见的被动式间接桩身内力测试元件。施工完成后,利用静压机复压、桩顶加载、自平衡等承载力速测方法,可智能化实现桩侧、桩端的动静阻力关系及承载机理的自动化检测和监测。该研究为施工工艺控制、岩土力学 AI 理论研究、承载力快速评价提供了新的智能化工具和途径。

5.3 桩基检测理论研究的探讨

桩身混凝土弹性模量是计算桩身承载力和变形的关键参数,然而关于弹性模量是否应选用恒定值,目前尚未形成统一意见,更缺乏明确的判断依据。何高峰等^[41]结合具体项目,同步开展了桩身混凝土芯样抗压强度试验、现场预留混凝土试块抗压强度试验、桩身混凝土芯样弹性模量试验以及桩身内力测试。通过室内试验和现场试验(利用桩身内力测试结果进行反演)的综合分析发现:同一取样深度桩身混凝土弹性模量的室内试验值表现出恒定性,但与设计混凝土强度等级对应的规范弹性模量取值存在显著差异;现场测试结果普遍低于室内试验结果,且无明显变化规律。研究认为,判定混凝土弹性模量是否取恒定值时,需重点考量弹性模量取值对桩身轴力等其他计算参数结果的影响程度。

5.4 预制桩检测技术探讨

某预制管桩工程在静载试验过程中,部分桩的

承载力未能达到设计要求。为查明原因,李明^[42]采用了高应变法、低应变法及孔内摄像法等多种检测手段进行联合检测,发现接桩部位的焊接质量不佳,导致桩身存在严重缺陷。该案例引发了关于验收检测结果能否客观反映桩基工程整体质量的深入探讨。统计分析表明,当前管桩承载力检测的数量偏少,存在一定的漏检风险。工程实践亦表明,仅依靠动测法进行管桩完整性检测,存在一定的漏判风险。为尽量减少漏检和漏判的风险,建议在完整性检测中增加孔内摄像检测,并将孔内摄像法与动测法联合使用,检测数量不宜少于 10 根。一旦发现质量问题,应以整个验收批为单位进行排查,并根据排查结果制定相应的验收闭合措施。

6 结论

2025 年是实施“十五五”规划承前启后的关键之年,也是推动桩基工程科技创新、深化学术合作的重要节点。通过学习研读第十六届全国桩基工程学术会议的交流内容与会议论文,对当前桩基工程理论研究与工程实践进展进行了梳理和总结,归纳出以下几点:

(1)大会特邀报告对桩基工程新兴技术进行了介绍,对当前桩基工程面临问题进行了探讨,对桩基规范修订内容进行了解读,对桩基工程未来发展进行了展望。这些观点不仅为行业发展指明了方向,也为实际工程应用提供了重要的理论指导和技术借鉴。

(2)在理论与试验研究方面,分别探讨了地区、温度、特殊土条件、施工方案对桩基工程的影响。通过大量室内试验和现场检测监测,揭示了复杂地质条件下桩基承载特性的变化规律,为特殊环境下桩基设计提供了理论依据。同时,针对不同压桩方案对施工参数的敏感性分析,提出了优化施工流程的具体建议,有效提升了桩基施工的安全性和经济性。

(3)在桩基设计方面,探讨了桩侧摩阻的取值、刚性桩在地基加固方面的应用以及人工智能技术融合应用的展望。这些研究成果不仅丰富了桩基设计的理论体系,还为不同工程场景下的桩基选型与参数优化提供了科学依据,有效提升了设计方案的合理性与经济性。

(4)在桩基施工技术与施工环境效应方面,介绍了静钻根植桩技术,探讨了在特殊地层中盾构切削对既有桩基的影响,以及低净空、人工智能、后注浆这些施工技术的要点和难点。这些内容构建了一套覆盖施工全流程的技术保障体系,为解决复杂地质与环境条件下的桩基施工难题提供了多元技术路径,同时

也为施工过程中的环境影响控制与环境保护提供了可操作的技术范例。

(5)在桩基检测技术方面,开展了不同检测方法的对比分析、检测规范的解读和检测理论的研究。通过对声波透射法、低应变反射波法、高应变动力试桩法等传统检测方法在不同桩型、地质条件下的适用性进行对比分析,结合近年来新兴的分布式光纤传感技术、超声波 CT 成像技术在桩身完整性检测中的应用案例,明确了各类桩基检测方法的优势边界与局限性。

参 考 文 献

- [1] 周进威, 苏 栋, 韩文龙, 等. 基于三维地质模型的城市深层地下空间开发适宜性评估 [J/OL]. 地学前缘, [2025-12-26]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.2.6>. (ZHOU J W, SU D, HAN W L, et al. Suitability evaluation of urban deep underground space development based on 3D geological modeling[J/OL]. Earth Science Frontiers, [2025-12-26]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.2.6>. (in Chinese).)
- [2] 王志如, 韩国权, 邓兴瑞, 等. 数智科技赋能韧性城市建设发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(4): 1-12. (WANG Z R, HAN G Q, DENG X R, et al. Resilient city construction enabled by digital intelligence technology [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 1-12. (in Chinese))
- [3] 王卫东, 王 萌, 吴江斌. 静钻根植桩扩底桩端极限承载性能的试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3091-3098. (WANG W D, WANG M, WU J B. Field study on the ultimate bearing capacity of enlarged grout base of pre-bored grouted planted pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3091-3098. (in Chinese))
- [4] 张旷成, 丘建金. 关于抗浮设防水位及浮力计算问题的分析讨论 [J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1): 15-20. (ZHANG K C, QIU J J. Analysis and discussion on water level for prevention of up-floating and calculation of uplift pressure[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(1): 15-20. (in Chinese))
- [5] 高文生, 杨 斌, 宫剑飞, 等. 建筑地基基础领域标准规范的技术进步与展望 [J]. 建筑科学, 2013, 29(11): 39-46. (GAO W S, YANG B, GONG J F, et al. Technical progress and prospect of standards in the fields of building foundation[J]. Building Science, 2013, 29(11): 39-46. (in Chinese))
- [6] 陈 凡. 基桩动力检测理论与实践 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025. (CHEN F. Theory and practice of dynamic pile testing[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025. (in Chinese))
- [7] 温 勇, 杨光华, 汤连生, 等. 广州地区花岗岩残积土力学特性试验及参数研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 209-215. (WEN Y, YANG G H, TANG L S, et al. Tests and parameters study of mechanical properties of granite residual soil in Guangzhou area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 209-215. (in Chinese))
- [8] 余小龙, 陈灏沆, 李 浩, 等. 珠海花岗岩区微型钢管桩承载特性试验研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 168-171. (YU X L, CHEN H H, LI H, et al. Experimental study on the bearing characteristics of micro steel pipe piles in Zhuhai granite area[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 168-171. (in Chinese))
- [9] 王子逸, 蒋 刚, 宗宸锋, 等. 考虑冷热循环效应的桩-土荷载传递模型研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 30-37. (WANG Z Y, JIANG G, ZONG C F, et al. Study on pile-soil load transfer model considering cooling-heating cycle effects [C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 30-37. (in Chinese))
- [10] 潘文曜, 高法军, 张恩博, 等. 温度和循环侵蚀对管桩混凝土抗硫酸盐侵蚀的影响研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 38-42. (PAN W Y, GAO F J, ZHANG E B, et al. Effect of temperature and cyclic erosion on the resistance of pipe pile concrete to sulfate attack[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 38-42. (in Chinese))
- [11] 陈俊杰, 王 腾. 黏土中大直径管桩贯入超孔隙水压力分析 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 76-80. (CHEN J J, WANG T. Analysis of excess pore water pressure during penetration of large-diameter pipe piles in clay[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 76-80. (in Chinese))
- [12] 杨红坡, 田泽刚, 冯仲文. 风化砂岩中后注浆旋挖灌注桩承载性能试验研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 177-180. (YANG H P, TIAN Z G, FENG Z W. Experimental research on bearing properties of post grouting rotary bored pile in weathered sandstone[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 177-180. (in Chinese))
- [13] 陈必光, 李 凯, 罗晓青, 等. 玄武岩纤维改良搅拌水泥土桩体受力性状试验研究 [C]//桩基工程技术进展

2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025. (CHEN B G, LI K, LUO X Q, et al. Experimental study on mechanical behavior of basalt fiber improved mixing cement-soil piles[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025. (in Chinese))
- [14] 邱明兵, 高文生, 倪克闯. 基于双弹簧反应位移法的桩侧土弹簧刚度试验验证 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 25-29. (QIU M B, GAO W S, NI K C. Experimental verification of soil spring stiffness on pile side based on double spring response displacement method[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 25-29. (in Chinese))
- [15] 张 聪, 王跻锬, 冯忠居, 等. 近断层桥梁嵌岩单桩动力时程响应振动台试验 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 49-56. (ZHANG C, WANG J K, FENG Z J, et al. Shaking table test of dynamic time history response of single pile embedded in rock near fault bridge[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 49-56. (in Chinese))
- [16] 何 赛, 季 鹏, 路 益. 压桩速率和插桩时间间隔影响敞口劲性复合桩压桩响应的模型试验研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 105-109. (HE S, JI P, LU Y. Model test study on the influence of pile driving rate and pile insertion time interval on the pile driving response of open-ended stiff composite piles[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 105-109. (in Chinese))
- [17] 杨 立, 覃 原. 软岩嵌岩段桩周阻力取值探讨 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 188-193. (YANG L, QIN Y. Discussion on the value of pile circumferential resistance in soft rock embedded sections[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 188-193. (in Chinese))
- [18] 王 翔, 吴圣超, 王 勃. 花岗岩地层泥浆护壁成孔灌注桩侧摩阻力取值探讨 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 242-246. (WANG X, WU S C, WANG B. Discussion on the value of shaft resistance of slurry-supported bored pile in weathered granite[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 242-246. (in Chinese))
- [19] 乔丽平, 李韵迪. PHC 管桩在某复合地基工程加固处理中的应用 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 198-201. (QIAO L P, LI Y D. Application of PHC pipe piles in the reinforcement treatment of a composite foundation project[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 198-201. (in Chinese))
- [20] 周圣斌, 王亚辉, 李嘉璐, 等. 某项目采用复合桩基加固方法的计算分析 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 226-230. (ZHOU S B, WANG Y H, LI J L, et al. Calculation and analysis of a project using composite pile foundation reinforcement method[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 226-230. (in Chinese))
- [21] 李元曦, 蒋正波, 李宙兴. 桩基设计中海洋欠固结土的固结特性及其参数 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 237-241. (LI Y X, JIANG Z B, LI Z X. Consolidation characteristics and parameters of marine unconsolidated soil in pile foundation design[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 237-241. (in Chinese))
- [22] 康旭云, 侯家健, 欧启捷, 等. 人工智能技术在桩基础设计的应用 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 247-250. (KANG X Y, HOU J J, OU Q J, et al. Application of multimodal artificial intelligence in pile foundation design[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 247-250. (in Chinese))
- [23] 谢宏丽, 周志军. 大直径 PRC 管桩桩基优化设计 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 221-225. (XIE H L, ZHOU Z J. Optimization design of large-diameter PRC pipe pile foundation[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 221-225. (in Chinese))
- [24] 夏庆鹏, 张光宝, 赵东阳, 等. 超高层建筑搅拌植桩的优化设计与性能研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 256-261. (XIA Q P, ZHANG G B, ZHAO D Y, et al. Optimized design and performance study of mixed pile foundations for super high-rise buildings[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 256-261. (in Chinese))
- [25] 李 强, 张 兴, 俞再鸿. 劲性复合桩在风电项目基础设计中的实践 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 251-255. (LI Q, ZHANG X,

- YU Z H. Practice on pile foundation design of wind power projects[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 251-255. (in Chinese))
- [26] 王 迪, 周 杰, 胡光阳. 静钻根植桩施工对土体位移影响研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 274-281. (WANG D, ZHOU J, HU G Y. Research on the influence of pre-bored precast concrete pile construction on soil displacement[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 274-281. (in Chinese))
- [27] 胡光阳, 周 杰, 刘 福, 等. 静钻根植桩施工周边环境影响现场试验研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 282-286. (HU G Y, ZHOU J, LIU F, et al. Field test on the impact of the surrounding environment on pre-bored precast concrete pile[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 282-286. (in Chinese))
- [28] 易 恒, 丘建金, 杨学文. 深厚软土地层预应力管桩偏位处理案例分析 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 310-314. (YI H, QIU J J, YANG X W. Case analysis of prestressed pipe pile lateral displacement in deep soft soil[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 310-314. (in Chinese))
- [29] 桑昊旻, 彭立才, 李利荣, 等. 超厚软土地质旋挖灌注桩桩底沉渣质量控制 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 232-327. (SANG H M, PENG L C, LI L R, et al. Quality control of bottom sediment for rotary drilling cast-in-place piles in ultra-thick soft soil geology[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 232-327. (in Chinese))
- [30] 盛志战, 刘青松, 矫伟刚, 等. 桅杆可伸缩式低净空多功能钻机研发及应用 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 332-335. (SHENG Z Z, LIU Q S, JIAO W G, et al. Research and application of telescopic mast low clearance multifunctional drilling rig[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 332-335. (in Chinese))
- [31] 梁尧祥, 李欣霖, 雷 斌. 高架桥下盾构穿越区低净空废旧灌注桩清除及桥基保护综合施工技术 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 336-342. (LIANG Y X, LI X L, LEI B. Comprehensive construction technology for removal of low-clearance waste grouting piles and protection of bridge foundation in shield crossing area under viaducts[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 336-342. (in Chinese))
- [32] 雷 斌, 李欣霖, 魏垂勇. 高铁桥下 5m 超低净空盾构穿越区隔离灌注桩组合成桩施工技术 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 343-348. (LEI B, LI X L, WEI C Y. High-speed railway bridge with 5m ultra-low clearance shield tunneling through isolation pile composite pile construction technology[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 343-348. (in Chinese))
- [33] 刘 动, 刘家国, 曾亮旗, 等. 盾构切削既有建筑物桩基变形控制研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 396-400. (LIU D, LIU J G, ZENG L Q, et al. Analytical solution calculation method research of pivot horizontal stiffness coefficient of inner support structure in deep foundation pit[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 396-400. (in Chinese))
- [34] 杨 军, 孙晓立, 杨正龙. PHC 管桩高质量智能焊接接桩技术与应用 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 366-372. (YANG J, SUN X L, YANG Z L. Research on high-quality intelligent welding jointing technology and application of PHC pipe pile [C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 366-372. (in Chinese))
- [35] 王双双. 桩端加载复合式后注浆技术中加载盒的应用研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 354-358. (WANG S S. Research on the application of load injection box in composite post-grouting technology with pile end loading[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 354-358. (in Chinese))
- [36] 庞作会. 高承载力桩端后注浆预制桩的工程试验和应用 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 425-430. (PANG Z H. Test on and application of high-bearing-capacity post-grouted prefabricated pile at pile tip[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 425-430. (in Chinese))
- [37] 杨嘉仪, 张修杰, 李世豪, 等. 声波透射法与钻芯法对混

- 凝土灌注桩完整性检测的对比分析及工程验证研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 414-419. (YANG J Y, ZHANG X J, LI S H, et al. Comparative analysis and engineering verification of acoustic transmission method and core drilling method for integrity detection of cast-in-place concrete piles[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 414-419. (in Chinese))
- [38] 李学文, 施 峰, 郑建民. 管波法在混凝土预制管桩检测方面的应用研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 457-462. (LI X W, SHI F, ZHENG J M. Application of tube wave detection method for integrity testing of tubular pile[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 457-462. (in Chinese))
- [39] 王光辉, 王 睿. 灌注桩钻芯孔成像检测孔壁清洗及机械胀压封孔浊水压排技术研究 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 447-451. (WANG G H, WANG R. Technical research on integrated borehole wall cleaning, mechanical expansion-compression sealing and pressurized turbid water discharge for core drilling hole imaging detection of cast-in-place piles[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 447-451. (in Chinese))
- [40] 吴 江, 王怀忠, 邓亚光, 等. 精密油压式荷载箱在管桩施工监控及未来智能桩的新应用 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 384-388. (WU J, WANG H Z, DENG Y G, et al. New applications of hydraulic load cells in pipe pile construction monitoring and intelligent foundation pile systems[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 384-388. (in Chinese))
- [41] 何高峰, 吕文龙, 马 绅, 等. 桩身内力测试中混凝土弹性模量的变与不变 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 438-442. (HE G F, LV W L, MA S, et al. Variation and invariance of concrete elastic modulus in internal force measurement of pile shafts[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 438-442. (in Chinese))
- [42] 李 明. 某桩基工程检测案例引发的预制管桩验收检测的思考 [C]//桩基工程技术进展 2025. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 452-456. (LI M. Thoughts on the acceptance inspection of prefabricated pipe piles triggered by a case of foundation engineering testing[C]//Technical Development of Pile Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 452-456. (in Chinese))

收稿日期: 2025-12-29