

文章编号: 1007-2993(2026)02-0159-06

建筑桩基工程“降碳”技术路径探索

冯彬^{1,2,3} 高文生^{1,3} 杨晓冬²

(1. 建研地基基础工程有限责任公司, 北京 100013; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 3. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

【摘要】 在“双碳”目标背景下, 桩基工程的“降碳”发展势在必行。根据桩基工程碳排放来源, 结合桩基工程特点, 从勘察、设计、桩型、施工、运维等角度出发, 提出桩基工程降碳的技术路径与方法, 包括: 勘察逼真, 充分发挥天然地基承载力, 在满足规范或设计对变形要求的条件下实现不用桩; 设计优化, 做到设计概念正确, 方案合理; 通过桩型创新使桩土深度融合, 强弱互补形成合力, 充分发挥桩土材料性能提高单桩承载力, 做到少用桩, 实现节材降碳; 施工降碳, 通过研发更加高效节能、绿色环保的桩工设备, 利用数字化、智能化管理手段提升工程质量, 合理利用资源, 提质增效; 旧桩利用, 通过正确评估使旧桩重获新生, 减少新桩数量; 开发桩基工程价值潜能, 做到一桩两用, 循环利用资源。

【关键词】 桩基工程; 降碳; 勘察; 设计; 桩型; 施工

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0163

Technical exploration for carbon reduction in building pile foundation engineering

FENG Bin^{1,2,3} GAO Wensheng^{1,3} YANG Xiaodong²

(1. CABR Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

【Abstract】 Under the implementation of China's carbon peaking and carbon neutrality goals, the low-carbon development of pile foundation engineering has become imperative. Based on analyzing the sources of carbon emissions in pile foundation engineering and considering its technical characteristics, this paper proposes carbon reduction technical pathways and methods from perspectives of investigation, design, pile type selection, construction, and operation-maintenance. Key approaches include: Accurate investigation to fully utilize natural foundation bearing capacity, thereby avoiding pile usage while ensuring compliance with deformation requirements in codes or designs; Design optimization through correct conceptual design and rational schemes; Pile type innovation via deep soil-pile interaction to achieve complementary strengths and reduce pile quantity; Performance enhancement by maximizing material properties to improve single-pile bearing capacity; Energy conservation by developing high-efficiency pile engineering equipment and eco-friendly practices; Quality-efficiency synergy through digitalization and intelligent technologies for enhancing engineering quality and optimizing resource utilization; Reutilization of existing piles through proper assessment to reactivate their capacity and minimize the number of new piles required; Unlocking the value potential of pile foundation engineering through dual-functional pile systems, thereby optimizing resource utilization.

【Key words】 pile foundation engineering; carbon reduction; investigation; design; pile type; construction

0 引言

绿色、环保、低碳的发展理念已深入人心, 工程建设领域对桩基工程品质的要求也在逐步提升, 除满足基本的承载功能和良好的服役性能外, 桩基工程被赋予了更多的价值潜能, 其中降碳是近年来“双碳”

战略背景下非常热门的研究方向。

根据《2022 年全球建筑建造业现状报告》^[1], 2021 年建筑物运营所产生的 CO₂ 排放量达到历史最高水平, 约 100 亿 t, 比 2020 年增加约 5%, 比 2019 年出现的上一个峰值高出 2%。如果包括建材生产(如

作者简介: 冯彬, 男, 1991 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计、施工和技术咨询工作。E-mail: 469244184@qq.com

通信作者: 高文生, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 主要从事桩基工程研究。E-mail: gwscabr@163.com

混凝土、钢材、铝、玻璃、砖块等)所产生的约 36 亿 t CO₂, 2021 年建筑物碳排放量占比约达到全球碳排放量的 37%。

从国内来看,随着“双碳”目标的提出,近年我国建筑行业低碳研究发展稳步推进。《近零能耗建筑技术标准》《建筑碳排放计算标准》《绿色建筑评价标准》《绿色建造技术导则(试行)》《建筑节能与可再生能源利用通用规范》等一系列标准规范的出台,促进了建筑行业绿色低碳的飞速发展。但是我国建筑碳排放的总量庞大,建筑碳排放涉及建材生产、建筑施工和建筑运行三个重要阶段,根据《2022年中国建筑能耗与碳排放研究报告》^[2],2020 年建筑全过程碳排放总量为 50.8 亿 t,占全国碳排放总量的 50.9%,建筑行业实施碳达峰、碳中和迫在眉睫。

建筑行业碳排放主要来源包括建材生产与能源消耗,以 CO₂ 当量计,每生产 1 t 水泥排放 0.65 ~ 0.95 t,生产 1 t 钢筋排放 1.8 t,每消耗 1 度电排放 0.785 kg,燃烧 1 L 柴油排放 2.68 kg,等等^[3-4]。桩基工程作为建筑工程的重要组成部分,同样离不开建材和能源的消耗。因此,桩基工程的降碳技术研究,也应从碳排放的源头入手,结合桩基工程特点,提出相应的技术路径。

本文从勘察、设计、桩型、施工、运维等角度出发,提出桩基工程降碳的技术路径与方法。

1 勘察逼真

地基基础方案选型及桩基设计参数依赖于工程勘察,在某些特定条件下,通过精心勘察确定更加真实、准确的地基承载力和变形计算参数,可充分发挥天然地基承载力,实现“不用桩”的目标,从根本上避免桩基工程的碳排放问题。

济南万科住宅项目^[5],基底下地基持力层为密实卵石,厚度大于 10 m,但其下有较厚的闪长岩残积土下卧层,变形验算不满足要求。原设计拟采用桩基,造价、工期和施工难度均较大。后通过深层平板载荷试验和旁压试验对该层土进行重新评价,其承载力特征值和压缩模量(见表 1)较勘察建议值均有大幅

表 1 济南万科住宅项目闪长岩残积土参数对比^[6]

Tab. 1 Comparison of diorite residual soil parameters for Jinan Vanke residential project

数据来源	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa
原勘察室内试验	220	8.6
深层载荷板试验	500	28
旁压试验	432 ~ 529	20 ~ 27

提高,经专家论证后取消桩基础,采用天然地基。

乌鲁木齐地区某项目^[7],大部分高层建筑高度为 100 ~ 120 m,部分超高层建筑总高度为 160 ~ 300 m,场地地层主要由素填土、卵石、圆砾、基岩构成,地基主要持力层为圆砾、卵石。勘察第一阶段,载荷试验深度为自然地面下约 5.0 m,最大加荷为 1300 kPa,取承载力特征值 $f_{ak}=650$ kPa,可满足该项目大部分高层建筑的设计要求,但对于高度 200 ~ 300 m 的超高层建筑,承载力不能满足设计要求。新疆地区多年来对于卵石(圆砾)承载力参数取值一般为 400 ~ 600 kPa。为更准确判断地基承载力,进行第二阶段勘察,载荷试验深度为自然地面下 15 ~ 21 m,试验最大加荷值为 3750 kPa,将地基承载力特征值提高至 1200 kPa,可满足本项目绝大部分建筑的设计要求,既优化了结构设计,也节约了建设投资、缩短了施工周期。

长沙北辰 A1 地块项目^[8],写字楼地上 45 层,结构高度 206 m,型钢混凝土框架-钢筋混凝土筒体结构,基底相对标高为 -21.80 ~ -16.30 m,地基持力层为强风化泥质砂岩。原勘察报告给定的地基承载力特征值为 500 kPa,不满足 800 kPa 的承载力设计要求。通过浅层平板载荷试验和旁压试验对该软岩地基工程特性进行原位测试,试验结果表明强风化泥质砂岩的天然地基承载力可以满足设计要求。考虑基础与地基协同作用对筏板基础天然地基方案的地基变形进行数值分析,最终确定采用天然地基方案。该项目为长沙地区首例软岩场地采用天然地基方案的超高楼。

首创丽泽金融商务区 F02 和 F03 地块项目^[9],地基持力层为卵石层。针对本项目中的 3 栋超高层建筑(高度分别为 120, 150, 200 m),在合理确定地基承载力的基础上,通过采用地基基础协同分析和变刚度调平设计,最终确定采用天然地基+筏板基础方案,极大地节约了建设成本和工期。该项目是北京地区在非岩石地基上采用天然地基的最高建筑物。

2 设计优化

设计优化的目标是“用好桩”,即做到设计概念正确,方案合理,将好桩用在持力处。以主群连体建筑桩基设计为例,其特点包括体型复杂、建筑高度不同、荷载分布不均匀,差异沉降难控制,结构刚度变化较大等。如采用传统设计方式,根据上部结构总荷载均匀布置基桩,则会导致主楼和裙房之间差异沉降较大,为控制差异沉降,则需增加桩数、桩长、桩径等,造成浪费。而采用基于沉降控制的桩基变刚度调平

设计理论,对桩土支撑刚度进行调整,根据荷载、地质条件和上部结构布局,考虑相互作用效用,采取增强与弱化结合、减沉与增沉互补、刚柔并济、强弱结合,实现受力局部平衡、沉降整体协调的目标^[10]。

上海中心项目^[11],结构屋面高度 580 m,建筑塔顶高度 632 m,地上 124 层,地下 5 层,基础埋深约 30 m,塔楼采用巨型框架结构-核心筒-外伸臂结构体系。桩基采用变刚度调平设计,不同部位采用不同的桩长和桩距。其中核心区桩长 56 m,梅花形布桩;巨柱区桩长 52 m,梅花形布桩;其余区域桩长 52 m,正方形布桩。监测数据显示主塔楼筏板基础沉降变化平缓,差异沉降满足设计要求。

北京中信大厦(中国尊)项目^[12],主塔楼建筑高度约 528 m,地上 108 层,地下 5 层,纯地下室部分地下 6 层,埋深约 37 m。考虑桩-土-地基-地下结构共同作用,地基基础整体设计为变刚度的筏板基础,主塔楼基础形式为变基桩支承刚度的桩筏基础,东西两侧纯地下部分基础形式为天然地基筏板基础。通过调整不同桩位、桩长、桩径、筏板基础厚度来实现差异沉降控制与协调,并取消沉降后浇带与裙楼抗浮桩。

西安金融中心项目^[13],塔楼地上 75 层,建筑总高度 349.7 m,商业裙房地上 3 层,建筑高度 24 m,裙房和主楼通过设置在地上 3 层的连廊连为一体,整体地下 4 层。桩基设计核心筒桩长为 70 m,外框柱桩长为 65 m,即通过适当弱化外框柱的基桩支承刚度来有效协调核心筒与外框柱之间的沉降差,从而实现更优的差异沉降控制目标。

北京丽泽 SOHO 项目^[14],结构高度 191.5 m,为筒体-单侧弧形框架的两个单塔与椭圆形腰桁架组成的结构体系。地上 45 层,地下 4 层,基础形式为桩筏基础。考虑到地基土为厚层密实砂卵石层及第三系软岩,设计采用“短桩”方案,避开第三系不利影响,充分发挥砂卵石层侧摩阻力,承载力达到设计预期;同时考虑桩土-筏板基础-结构相互作用进行基础沉降变形计算分析,桩筏设计方案满足差异沉降控制限值要求。

北京大兴国际机场项目^[15],包括航站楼、高架桥和停车楼、综合服务楼等三个建筑单元,主体结构采用全现浇钢筋混凝土框架结构,屋顶及支撑结构采用钢结构,基础采用桩筏基础。其地基基础变形控制难点包括:①地层土质不均匀;②建筑规模宏大;③主体结构体系复杂,荷载分布不均匀;④航站楼中心区地下高铁和地铁贯穿。桩筏基础设计采用建筑+结构+地基协同设计思路,考虑桩土相互作用,采用变形和

承载力双控准则,通过“调整桩基设计方案→数值建模计算→沉降变形结果分析反馈”反复迭代,确定桩筏基础设计方案,并对桩型成桩工法进行比选,经过设计施工密切配合,桩基均达到设计要求。

3 桩型节材

桩基工程的主要建筑材料(包括水泥、钢筋等)在生产过程中的碳排放量在桩基工程碳排放总量中的占比较大。因此,通过研发更为节材的新桩型或提升桩基承载性能以减少材料用量,是桩基工程降碳发展的重要技术手段。

3.1 桩型创新

近年来涌现出很多新桩型,包括:沿桩身纵向变截面桩,如串珠形、锥形、钉形、倒锥台形、双锥台形等;异形横截面桩,如 H 形、X 形等;全液压旋挖扩底灌注桩(AM 工法桩)、扩径扩底混凝土灌注桩、螺杆桩等。各种新桩型的目的都在于将桩与土深度“融合”,通过扩大桩-土接触面积优化荷载传递,在同等的承载力要求下能够减少桩基耗材,达到“少用桩”的目的,从而实现降碳目标。

以扩径扩底混凝土灌注桩为例^[16],通过创新性的“穿越法”施工工艺,对桩身分段局部扩径,形成类似“串珠形”桩身,从而提高桩基承载力。对总荷载分别为 15000, 9000, 6000 kN 的高层、小高层及多层建筑进行桩基选型,对比扩径扩底灌注桩与传统的预应力混凝土管桩、长螺旋钻孔压灌桩、旋挖钻孔灌注桩、冲击钻孔灌注桩、反循环钻孔灌注桩等的碳排放量,结果如表 2 所示。表 2 中为包含建材生产、运输和建造阶段的碳排放量^[17],可见扩径扩底灌注桩的单位承载力碳排放量与几类传统工艺相比可降低约 70%~90%,降碳效果显著。

表 2 不同工艺基桩单位承载力碳排放量对比 kg/kN
Tab. 2 Comparison of carbon emissions per unit bearing capacity for different piling technique

施工工艺	高层	小高层	多层
扩径扩底灌注桩(圆桩)	0.774	0.757	0.748
扩径扩底灌注桩(方桩)	0.675	0.678	0.672
预应力混凝土管桩	1.489	1.389	1.441
长螺旋钻孔压灌桩	1.170	1.402	1.545
旋挖钻孔桩	1.283	1.293	1.767
冲击钻孔灌注桩	1.323	1.335	1.827
反循环钻孔灌注桩	1.283	1.293	1.769

3.2 性能提升

桩基承载性能的提升,是指通过充分发挥桩土

材料性能,提高单桩承载力,在同等承载力要求下能够减少桩基材料用量,从而实现降碳目标。

预制桩是高强度桩的典型代表。目前各类预制桩已广泛应用于地基处理、基础工程及基坑与边坡支护工程,如地基处理中使用的混凝土劲性体、工字桩等;基础工程中使用的空心方桩、实心方桩、预应力高强混凝土管桩(PHC)、PRC桩、SC桩、超高强度桩、抗拔桩、防腐桩等;基坑与边坡支护中使用的护壁桩、波浪桩、U型板桩等。

对比普通灌注桩与PHC管桩的承载力,在造价基本相同的情况下,PHC管桩的承载力约为灌注桩的2.1~2.7倍;在PHC管桩基础上进一步研发的超高强混凝土管桩,通过在传统C80PHC管桩混凝土材料中添加高性能掺合料,并调整离心、养护等工艺,使桩身混凝土强度等级提升至C105—C125,相同规格管桩的轴心受压承载力相比C80PHC管桩能够提升20%~44%,从而节约材料用量,减少碳排放。

预制空心桩内夯载体桩也是充分发挥桩土材料性能的一项典型技术。该技术是将底端封闭的预制空心桩沉入土体一定深度,利用柱锤通过桩中心孔向桩底端反复夯填水泥砂拌合物,在侧限约束下,使桩底以下一定范围内的土体得到密实,在管桩底部形成由夯扩体、挤密土体、影响土体组成的“载体”,实现桩身、夯扩体、挤密土体及影响土体一体化承载,从而大幅提高承载力。对比常规灌注桩与预制空心桩内夯载体桩的单位承载力造价,常规土层中直径800mm、长度15m的灌注桩单位承载力造价约9.09~7.69元/kN,相同桩长的直径500,600,700mm的预制空心桩内夯载体桩单位承载力造价则分别为3.85,3.03,2.22元/kN,约为传统灌注桩的1/3,可大幅节约材料用量,减少碳排放。

4 施工减碳

桩基工程施工减碳途径有二。一方面可通过研发更加高效节能、绿色环保的桩工设备,另一方面可通过桩基工程的数字化、智能化发展,精细施工管理,提升工程质量,合理利用资源,从而实现减碳目标。

4.1 节能减排

桩基工程的实施离不开各类桩工设备,目前常规钻机通常以柴油作为能源,燃烧1L柴油的碳排放量约2.68kg,1台中大型钻机的油耗约50L/h,则一台钻机的每小时CO₂排放量约为134kg。按照每年运行3000h计,一台钻机的年CO₂排放量高达402t。而一棵树一年仅能吸收21kg的CO₂,需要约40000棵树才能吸收一台钻机1年的碳排放量。目前我国

约有5万台钻机,按照有50%的钻机运行,则全国钻机年CO₂排放量高达1000万t,需要约10亿棵树才能平衡全国钻机的碳排放量。因此研发更加高效节能的桩工设备对桩基工程碳减排至关重要。

如用于旋挖钻机的EEP节能装置^[18],旨在提高设备的能源利用效率,降低燃油消耗和运行成本,同时减少对环境的影响。使用EEP能够使钻机的生产效率提高10%,燃油消耗降低20%~30%,噪声降低50%。以一台油耗为60L/h、钻进速度6.0m/h的钻机作为参照,其每延米CO₂排放量为26.8kg;使用EEP的旋挖钻机油耗能够降低20%,油耗降至48L/h,钻进速度提升至6.9m/h(提升15%),相应每延米CO₂排放量为20.6kg,较普通钻机降低23%。按照累计运行10000h计算,总CO₂排放量约1367t,较常规钻机减少241t,相当于11476棵树一年的CO₂吸收量,降碳效果显著。

4.2 提质增效

在传统的工程管理模式,桩基工程事故时有发生,如某预制桩工程中出现大规模的桩基移位、倾斜事故;某重点项目灌注桩截桩排查显示157根桩中有77根桩在桩顶标高位置未见钢筋笼,占比近50%。此类事故的处理通常代价高昂,并会严重影响工期,造成巨大的资源浪费。而采用数字化、智能化管理手段可最大程度地避免此类事故。

桩基工程数字化、智能化管理可利用卫星定位系统精确定位桩位,确保施工精度;使用传感器实时监测桩基施工中的深度、垂直度、承载力等关键参数,并通过4G/5G网络将数据上传至云端服务器。建设、施工、设计、监理等参建各方可通过PC管理终端或手机APP实时查看施工数据,提升管理效率。

以喷扩锥台压灌桩质量管理体系为例,智能监控系统可以对桩位定位、成孔深度、注浆灌注量、注浆压力、精准扩径体高度、复压扩径体砣高度、砣灌注量等进行全方位监控。通过应用物联网、电子工程、传感器、大数据技术进行准确、高效、可靠的全过程工程管理,实现提高工程质量、改善综合效益的目标。

5 旧桩利用

随着城市建设的发展,越来越多的改扩建项目需要面对如何处理旧桩的问题。采用回避或移除旧桩的方式虽然方案简单,但会造成较大的资源浪费,而且在新桩位布置或旧桩拔除过程中会有一定困难,不推荐使用。对旧桩的重新利用则是更加经济合理、绿色低碳的方案。

旧桩利用首先要掌握完备的旧桩信息,包括设计、施工及运行情况,然后对旧桩的承载力和耐久性进行评估,必要时可以对旧桩进行加固,布桩方式和施工方案也需要考虑对旧桩的影响。旧桩利用方案可以大大减少向地基中新增桩材,节约造价的同时也可大大降低桩基工程碳排放量^[19]。

上海周浦镇平板玻璃厂“退二进三”公租房建设一期工程^[20],需在原址上新建建筑,原方案拟先拔除所有旧桩再打新桩。通过对旧桩的桩身完整性、单桩抗压和抗拔极限承载力、耐久性进行检测评估,发现旧桩极限承载力和桩身完整性满足设计要求,钢筋表面未达到腐蚀阈值,可以继续利用,并在施工中采用预钻孔+应力释放孔措施减轻新打桩对旧桩的影响。该项目共利用旧桩 212 根,节约造价 1200 万元,减少了环境污染和碳排放,取得了良好的社会效益和经济效益。

6 价值潜能

在利用桩基承载功能的基础上,开发桩基工程的价值潜能,循环利用资源,做到“一桩两用”,也是实现桩基工程“降碳”发展的一个重要路径。

以地热能利用为例,传统地源热泵工程存在诸多难题,如地理管打孔可能受到当地地质条件限制、系统设计要求较高(需建筑、暖通、岩土等多专业协作)、地理管直接暴露容易老化失效、初期投入成本相对较高、投资回收期较长等。能源桩是一种基于地源热泵技术提出的新型桩基,可以同时起到承担上部结构荷载和桩土换热的作用,实现“一桩两用”。能源桩以桩基埋管的形式来代替复杂的换热管网,在节省空间的同时可节约专门打孔埋管的费用,还可以减少换热管的腐蚀,延长换热管的使用寿命。此外桩基混凝土的导热系数高于土壤,因此能源桩的热效率也高于传统地源热泵技术。在合适的工程地质与水文地质条件下,能源桩是实现桩基工程降碳的有效技术路径之一。

芜湖长江 LNG 内河接收(转运)站项目,LNG 储罐基础桩采用混凝土灌注桩,设计桩长 53 m,桩径 1.2 m,每罐 300 根。在该项目中开展了 LNG 储罐超长直径能源桩关键技术与工程应用,研究内容包括超长直径能源桩传热试验、热力耦合试验、管阻试验等,为能源桩在科学研究与工程应用方面取得了宝贵的研究成果。

7 结论

在我国“双碳”战略的大背景下,桩基工程的“降碳”发展势在必行。桩基工程降碳应根据碳排放来

源,从勘察、设计、施工、检测、使用、运维等桩基工程的全生命周期出发,通过人、机、料、法、环等多要素分析,提出桩基工程降碳的技术路径与方法,主要体现在以下几个方面:

(1)通过精心勘察确定更加真实、准确的地层参数,充分发挥天然地基承载力,在满足规范或设计对变形要求的条件下实现“不用桩”的目标,可以最大程度地减少桩基工程碳排放。

(2)通过设计优化做到设计概念正确、方案合理,如采用基于沉降控制的桩基变刚度调平设计理论,得到更加优化的设计方案。对于地基中存在旧桩的改扩建项目,在充分评估的基础上应尽量利用旧桩。

(3)通过桩型创新,将桩与土深度“融合”,使桩土强弱互补形成合力,或通过充分发挥桩土材料性能,均可实现提升桩基承载能力的目标,从而减少桩基耗材,降低碳排放。

(4)研发更加高效节能的桩工设备,是桩基工程节能减排的有效手段;推动桩基工程的数字化、智能化发展,实现准确、高效、可靠的全过程工程管理,从而提升工程质量,避免工程事故,实现资源的合理利用。

(5)开发桩基工程的价值潜能,循环利用资源,如能源桩技术,能够做到“一桩两用”,也是未来桩基工程“降碳”发展的重要路径。

参 考 文 献

- [1] The United Nations Environment Programme. Global status report for buildings and construction[R]. 2024.
- [2] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[R]. 重庆, 2022. (China Association of Building Energy Efficiency. China building energy use and carbon emissions research report (2022)[R]. Chongqing, 2022. (in Chinese))
- [3] 联合国政府间气候变化专委会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[M]. 日本: 日本全球战略研究所, 2006: 1-10. ((IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Japan: Global Strategy Institute, 2006: 1-10. (in Chinese))
- [4] 于运星. 面向建筑设计的碳排放因子标准化量算方法及数据库研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023. (YU Y X. Research on standardized calculation method and database of carbon emission factor for architectural design[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023. (in Chinese))
- [5] 顾宝和. 岩土工程典型案例述评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (GU B H. Reviews and case studies

- of representative geotechnical engineering projects[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [6] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (State Administration of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 吴浩彦, 丁冰, 张长城. 乌鲁木齐地区某超高层建筑岩土工程勘察实录: “第八届全国岩土工程实录交流会”岩土工程实录集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 252-258. (WU H Y, DING B, ZHANG C C. Geotechnical investigation record for a super high-rise building in Urumqi: Proceedings of the 8th national symposium on geotechnical engineering case records[C]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 252-258. (in Chinese))
- [8] 方云飞, 王媛, 孙宏伟. 长沙北辰项目高层建筑软岩地基工程特性分析[J]. 工程勘察, 2015, 43(7): 11-17. (FANG Y F, WANG Y, SUN H W. Geotechnical analysis of weak rock ground for high-rise building of North Star Project in Changsha[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(7): 11-17. (in Chinese))
- [9] 李培, 周筭, 齐五辉, 等. 首创丽泽金融商务区 F02 和 F03 地块地基基础设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(20): 65-70. (LI P, ZHOU S, QI W H, et al. Foundation design of buildings in F02 and F03 plots of Shou Chuang Lize Financial Business District[J]. Building Structure, 2018, 48(20): 65-70. (in Chinese))
- [10] 王涛, 高文生, 刘金砾. 桩基变刚度调平设计的实施方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 531-537. (WANG T, GAO W S, LIU J L. Study on implementation method for optimization design of pile foundation stiffness to reduce differential settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 531-537. (in Chinese))
- [11] 汪大绥, 包联进, 姜文伟, 等. 上海中心大厦结构第三方独立审核[J]. 建筑结构, 2012, 42(5): 13-18. (WANG D S, BAO L J, JIANG W W, et al. Peer review in the structural design of Shanghai Center Tower[J]. Building Structure, 2012, 42(5): 13-18. (in Chinese))
- [12] 孙宏伟, 常为华, 宫贞超, 等. 中国尊大厦桩筏协同作用计算与设计分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(20): 109-114. (SUN H W, CHANG W H, GONG Z C, et al. Calculation and analysis of piled raft foundation interaction of China ZUN Tower[J]. Building Structure, 2014, 44(20): 109-114. (in Chinese))
- [13] 方云飞, 王媛, 孙宏伟. 国瑞·西安国际金融中心超长灌注桩静载试验设计与数据分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(17): 99-104. (FANG Y F, WANG Y, SUN H W. Static loading test design and data analysis on super-long bored pile of Glory·Xi'an International Financial Center[J]. Building Structure, 2016, 46(17): 99-104. (in Chinese))
- [14] 方云飞, 王媛, 孙宏伟, 等. 丽泽 SOHO 地基基础设计与验证[J]. 建筑结构, 2019, 49(18): 87-91, 114. (FANG Y F, WANG Y, SUN H W, et al. Foundation design and verification of LEEZA SOHO[J]. Building Structure, 2019, 49(18): 87-91, 114. (in Chinese))
- [15] 束伟农, 朱忠义, 祁跃, 等. 北京新机场航站楼结构设计研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(17): 1-7. (SHU W N, ZHU Z Y, QI Y, et al. Design and research on terminal building of Beijing New Airport[J]. Building Structure, 2016, 46(17): 1-7. (in Chinese))
- [16] 刘献刚, 熊小林, 刘斌, 等. 多段扩径混凝土灌注桩的施工方法: CN114960625A[P]. 2022-08-30. (LIU X G, XIONG X L, LIU B, et al. Construction method of multi-section expanding cast-in-place concrete pile: CN114960625A[P]. 2022-08-30. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [18] 徐建, 郭传新, 刘双. 2019 德国 bauma 展上的桩工机械[J]. 建筑机械, 2019(7): 9-13. (XU J, GUO C X, LIU S. Pile machinery at 2019 bauma exhibition in Germany[J]. Construction Machinery, 2019(7): 9-13. (in Chinese))
- [19] 杜斌, 刘祖德, 聂向珍. 城市中的旧桩基问题及处理方法探讨[C]/第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 武汉: 中国岩石力学与工程学会, 2006: 29-35. (DU B, LIU Z D, NIE X Z. Dealing with old pile foundation in cities[C]/Proceedings of the Second National Symposium on Geotechnical and Engineering. Wuhan: Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, 2006: 29-35. (in Chinese))
- [20] 姚建平. 既有桩再利用及新旧桩混合使用条件下的静压新桩施工控制工艺研究[J]. 建筑施工, 2016, 38(4): 402-405. (YAO J P. Study on construction control technology for new static pressure piles under condition of recycled existing piles and new-old mixed piles[J]. Building Construction, 2016, 38(4): 402-405. (in Chinese))