

第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告—— 桩基础的发展现状综述

聂庆科^{1,3} 周玉明²

(1. 河北建设勘察研究院有限公司,河北石家庄 050031;2. 天津市勘察院,天津 300191;
3. 河北省岩土工程技术研究中心,河北石家庄 050031)

【摘要】 桩基础仍是研究的热点和发展最快的基础型式。根据国内外近年来桩基础研究取得的相应成果,重点介绍了①桩基础设计新方法;②桩基的新类型;③桩基施工新技术;并提出了未来桩基发展的新趋势。

【关键词】 桩基础;桩基础设计;桩基类型;桩基施工;

【中图分类号】 TU 473.1

【文献标识码】 A

doi:10.3969/7issn.1007-2993.2015.05.003

An Overview of Pile Foundation

Nie Qingke^{1,3} Zhou Yuming²

(1. Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation, Tianjin 300191, China;

3. Research Center of Geotechnical Engineering Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

【Abstract】 Pile foundation is still a research focus and fastest development. According to the research achievement in the recent years, the new pile design methods and new pile types and new pile construction technologies are presented in the paper and the development trend of pile foundation in future is also presented.

【Key words】 pile foundation; pile foundation design; pile type; construction of pile

0 引言

桩基础是工程建设中常用的基础型式,也是发展最快的基础型式。早在 7000~8000 年前的新石器时代,人们就在湖泊和沼泽中栽设木桩,筑平台修建居住点,以防止野兽侵犯。我国是桩基础应用最早的国家,最早的桩基础是在浙江省河姆渡的原始社会居住遗址中发现的。到宋代,桩基技术就已发展得比较成熟。到了明清两代,桩基技术更趋完善。如清代的《工部工程做法》一书对桩基的选料、布置和施工方法等方面都有了规定,堪称是一部较早的桩基技术规范。

桩基础是在天然地基不能满足上部结构对承载力、变形或稳定性要求的条件下采用的一种基础型式,在这个条件下应正确认识地基条件、桩基的适用条件及需要达到的要求,按着全面满足建筑物功能要求的承载力、变形及工程验收评价标准进行桩基础的设计、施工及验收,因此就需要全面认识桩基础的设计方法、类型、施工以及试验、检测和评价方法。

桩基础是伴随着工程建设的发展而发展,也伴随着计算机技术和其它相关学科的发展而发展。在第 18 届国际土力学与岩土工程大会上来自 26 个国

家提交的有关桩基础的论文为 62 篇^[1],论文的主题丰富、涵盖了多方面的内容,包括:①基础的形式和性能;②施工技术;③桩基础的数值分析;④现场试验;⑤地震灾害作用分析;⑥设计方法;⑦模型试验;⑧通过试验进行预测等。在这些涵盖的内容中,大多数的论文都采用了数值模拟分析技术,这与我国在上海举办的第十二届全国土力学及岩土工程学术大会上有关桩基础的论文一致^[2],反映了桩基础发展的新趋势。但是面对生存环境的变化、资源的减少而提出的节能减排与可持续发展的人类科技进步的新理念,对研究和实践桩基技术的学者和工程师们又提出了新的课题和挑战。

1 实录中的桩基技术综述

本届《岩土工程实录》中,收集到有关桩基础实录的论文 7 篇,内容集中在桩基勘察、设计、施工、检测和试验。本次《岩土工程实录》收集的有关桩基础的论文不多,但基本能代表当前桩基发展的较新水平。

孙宏伟、高云飞等的《唐山新世界中心岩溶地质桩基勘察设计实录》一文,内容包括了在岩溶地质条件下的桩基础的勘察设计。作者通过对建筑物岩溶

地质条件的详细分析,确立了桩基础的设计思路,即:初步设计→试验桩设计、施工、检测试验→试验数据分析→桩基础的设计方案调整→施工勘察→岩溶治理→工程桩施工→工程桩承载力检验→沉降观测,设计思路清晰、严谨、科学。特别是作者在基础布桩方案设计完成后进行了基础与上部结构共同作用的协同分析,以进一步检验桩基础设计的合理性。这一做法值得在桩基础设计中加以提倡。

雷阳军《某山地项目桩基工程施工浅析》一文,阐述了复杂地质条件下勘察成果资料的准确性对桩基设计施工的重要性。作者实录了某一山前坡地,由于勘察工作不准确,桩基施工过程中和桩基质量出现了一系列问题,不得不花费大量的人力物力和时间进行处理,其经验和教训是深刻的。

王国辉、李友东等的《滨海强腐蚀地区钻孔灌注桩工程施工实录》一文,介绍了在强腐蚀地区进行灌注桩施工如何满足桩身抗腐蚀的要求。作者在认真分析混凝土腐蚀机理的基础上,通过大比例掺加矿物掺合料成功满足了桩身混凝土的抗腐蚀性能要求,不仅降低了工程造价,更有效节约了资源。基础的耐久性直接关系到建筑物的使用寿命,因此在基础的设计施工时,应体现减少资源使用和更好满足耐久性要求的理念。

黄奕芳的《某楼盘桩基础质量事故分析及补强施工技术》一文,实录了在桩基出现事故后采取的补强措施,作者在对事故原因深入分析之后,并对可能采取的补强措施进行了技术经济论证。在此基础上提出了在桩侧和桩端进行注浆补强加固的技术方案。实施效果表明,该方案经济合理、效果明显有效。通过该实录可以得到这样的启示,出现桩基事故后,首先应对事故原因深入分析,这是提出后期处理措施的基础,其次应对处理措施进行技术经济论证,以选取最优的处理方案。

侯黄杰、魏河涛等的《旋挖钻孔工艺在岩溶地质中的应用》一文,实录了旋挖钻机在岩溶地质条件中的成孔经验,包括溶洞穿越方式,钻具选取及钻进方法等。旋挖钻机通常用于土层中钻孔,具有成孔速度快,无泥浆污染等优点,一般在基岩地层中慎用。如用在岩溶地质中更易发生钻孔事故,如卡钻、埋钻等。作者的工程经验对拓展旋挖钻机成孔工艺的应用范围有借鉴意义。

马大岩、少峰等在《某工程钢筋混凝土灌注桩试验桩试验工程实录》中,详细介绍了某桩基试验过程及试验结论。特别是作者根据试桩情况在结论中

提出,在竖向荷载作用下,桩顶应力集中导致达到混凝土强度极限,从而引起桩身混凝土破裂,并建议桩基设计时应综合考虑桩身强度及荷载效应。桩基试验不仅是试验桩的承载力和变形,桩基试验的内容应是全面的,这篇实录给出了很好的启示。

戴光寿、刘艳东等在《水下灌注不留施工缝的高承台桩施工实录》一文中介绍了一种高承台桩的施工方法。该方法可有效保证高承台桩的地高以上和地高以下桩身的连续和一致性,对高承台桩施工具有很好的借鉴意义。

2 桩基础设计与承载特性研究的新进展

桩基础设计与承载性状研究一直是桩基础领域研究的热点,随着计算机技术和数值分析技术的发展,桩基础设计方法与承载性状研究也取得了新进展。在第18届国际土力学与岩土工程大会上有关桩基础的62篇论文中大部分与设计方法和桩的承载特性有关^[1]。

Balakumar^[1]等人介绍了一种桩筏基础设计方法。这种方法将设计分成两个阶段:第一阶段就是确定最合理的桩数,包括桩长和桩径,从宏观角度满足建筑物沉降和荷载的要求;第二个阶段是基于有限元计算软件 ANSYS 和大量土性参数研究,建立了建筑物3D模型,并完成建筑物整体协同分析计算。在论文中,作者还强调了原位测试土性参数的精确度及评价对桩筏基础设计的重要性。

刘金励、秋仁东等^[3],根据24组51根桩竖向静载试验的侧阻力、端阻力测试结果进行深入分析,分析结果表明,桩侧土层与分布、桩的长径比、后注浆效应是影响侧阻性状和分布的主要因素,并把工作荷载作用下的侧阻分布概化为六种模式,即正梯形、倒梯形、橄榄形、灯笼形、蒜头形、峰谷形。端阻比随侧阻增强、长径比增大而降低,随荷载水平呈非线性增长。并给出了工作荷载下端阻比参考值。

赵春风、李俊等^[4],通过广东软土地区大直径超长钻孔灌注桩大吨位静载试验,分析了该区大直径超长钻孔灌注桩承载特性及荷载传递机制,为该地区大直径超长桩的理论研究和工程应用提供了宝贵数据:试桩直径1.8 m,桩长分别为73.37 m和78.36 m。试验结果表明,试桩的Q-s曲线呈缓变型,桩端承载力分担总荷载的比例低于15%,表现为摩擦桩特性;随着桩顶荷载增加,桩土相对位移沿桩身的递增幅度呈先增大后减小的趋势;淤泥质粉质黏土和淤泥达到极限侧摩阻力所需的桩土相对位移分别为17 mm和6 mm,砂土达到极限侧摩阻力

所需的桩土相对位移为 22~27 mm, 桩身上部土层侧摩阻力发生不同程度的软化; 桩身上部粉质土的桩土相对位移为 18~23 mm, 在桩土总的相对位移达 40 mm 时, 下部粉质黏土层侧摩阻力达到极限值的 87% 以上, 在桩土相对位移继续增大时, 侧阻增加趋势较为平缓, 并逐渐接近极限值; 风化砂岩侧摩阻力随桩土相对位移的增加而增大, 极限荷载下侧摩阻力未完全发挥, 桩端阻力随桩端沉降量的增加呈加工硬化型, 尽管已加载至地基土破坏, 但桩端阻力并未完全发挥。文中还提到, 由于桩径、桩长较大, 桩侧土易产生松弛效应, 以及较厚泥皮导致侧阻力发挥不足, 桩端土的压缩是引起桩顶沉降的主要原因。

黄跃群、刘耀儒等^[5]采用有限元方法研究了复合桩基础——大承台承载力的特性。以接触模型模拟混凝土/地基接触面, 分端承型和摩擦型两种类型的桩, 研究了承台底地基土强度和外荷载大小对桩基础承载力分配的影响。结果表明, 端承型和摩擦型桩的承载力分配存在较大不同, 端承型桩的端阻力随承台底土强度的增大而增大, 侧阻力基本不变, 承台效应不明显; 摩擦型桩的侧阻力随承台底土强度的增大而减小, 端阻力基本保持不变, 承台效应明显。但两种类型桩的承台效应都随承台底土强度的增加而加强; 端承型和摩擦型桩基础的端阻力与外荷载的比值都随外荷载的增加而减小, 侧阻力和承台承载力随外荷载的增大而增大。

变刚度调平设计是桩基础设计发展的新理念, 其基本思路是: 在桩基础设计中, 考虑地基-基础-上部结构的共同作用, 调整影响沉降变形场的主导因素——桩土支承刚度, “抑强补弱”, 促进沉降均匀。具体来说, 就是采取变桩长、变桩距(如油罐基础的内密外疏布桩)、桩基与复合桩基共用(如框-筒结构、内筒桩基、外框复合桩基)、强化与弱化结合, 优化桩土支承刚度分布, 使其与荷载分布和相互作用相匹配, 促进沉降趋于均匀, 反力分布优化, 承台内力减小。这一先进的设计理念中, 桩基的反力分布到底如何? 王涛通过模型试验和实际工程测试给出了结论^[6]。结果表明, 工作荷载作用下, 核心筒下不同区位的桩顶反力随荷载水平提高而增加, 核心筒外围框架柱下的桩顶反力与核心筒下桩顶反力一样, 趋于均匀, 表明变刚度调平设计可调整反力分布, 改善承台的受力性状。模型试验中, 核心筒桩顶反力随荷载水平的提高而增加, 提高的比率是: 角桩最大, 边桩次之, 中心桩最小; 在工作荷载下, 桩筏基

础中, 角桩、边桩、中心桩反力与平均值的比值分别为 1.15、1.02、0.83, 极限荷载下则为 1.02、0.96、1.02。工程实测结果与模型试验基本一致, 实测结果表明, 主楼不同区位桩顶反力随荷载水平的提高而增加, 外框架角柱下桩顶压力 > 外框架边柱下桩压力 > 核心筒下桩压力。桩顶压力随桩筏基础总荷载水平的提高而趋向均匀。

秋仁东、刘金励等^[7]通过大比例尺模型试验研究了长群桩基础的沉降性状。研究表明, ①在小荷载水平下, 对于长桩而言, 桩顶的沉降大都是由桩身压缩量引起的; ②工作荷载下, 群桩基础中基桩的压缩沉降比例要小于单桩基础的试验结果, 这是由于群桩效应导致桩端下土体整体压缩量比例较大引起; ③桩端土的整体压缩沉降, 既与桩端持力层性质有关, 又随桩长、桩距、桩的排列、桩的数量而变化。桩数多、桩距小, 土的压缩层厚度大, 压缩变形量大, 但桩间土的压缩量相对较小; ④桩距大、桩数相同的情况下, 桩端以下的压缩层深度和压缩量将相应减小。

邵忠安、戴涛军^[8]以深圳 LNG 储罐试桩工程为背景, 分析了在大型 LNG 储罐试桩设计方法中的中欧规范的差异。依据欧洲 LNG 储罐设计规范对深圳 LNG 储罐试桩最大加载量进行了正确选取, 并以中国规范对试桩最大加载量进行了分析比较, 借此将与 LNG 储罐设计与施工相关的中欧规范衔接。结果表明, LNG 储罐设计基准远远高于一般工程项目的设计基准, 中欧规范对此的描述基本一致, 针对 LNG 储罐桩基设计, 运用国内规范可以在一定程度上分析解释欧洲规范相应规定的合理性。体现了中欧规范关于 LNG 储罐设计的相通性。在经济全球化的大背景下, 该论文对我国的桩基础设计如何与国际接轨, 并迈上国际化具有一定的参考价值。

3 桩基的新类型

桩基类型的发展主要围绕截面变径, 截面异形和改变桩土接触面。截面变径包括: 钻孔扩底灌注桩、多节钻扩灌注桩、多节扩孔灌注桩、旋扩珠盘桩及挤扩灌注桩等, 是在等直径钻孔中的不同位置, 通过适当的施工工艺, 钻或挤扩出大于原等直径钻孔的扩大体, 以提高桩的承载能力, 降低工程造价。

截面异形桩是一种特殊的桩类型^[9], 采用异形桩更能贯彻桩基设计的一个重要原则, 即最大程度地发挥地基土和桩本身的潜力。主要表现在: ①改变桩的横截面, 以取得有利于承载力增加的力学效

果;②异形桩的横截面一般为非轴对称形,其抗弯能力有明显的方向性,设计者通常将桩抵抗弯曲能力最大的方向安排得与横向荷载方向一致,从而最大程度地发挥了桩身材料的潜力,并节约成本;③改变桩身的竖向形状,以增加桩土界面的不平直度和粗糙度,从而取得较大的侧摩阻力。截面异形桩是近年来发展较快的桩基新类型。

改变桩土接触面是指通过某种工艺以提高桩周土和桩端土的接触强度,或通过某种工艺,改变桩与桩周土的接触方式等,从而大幅度提高桩的承载能力,减小桩的沉降,如后注浆工艺等。

现浇 X 形混凝土桩是由河海大学岩土所研发的一种截面异形桩^[10]。该技术是利用普通沉管灌注桩机以一种截面如字母“X”形的钢模代替传统的圆形钢模,经过沉管、浇筑混凝土、养护等工序形成截面为 X 形的现浇混凝土桩。X 形桩由于有较大的周长面积比,因而可以在不增加混凝土用量的前提下大大提高单桩承载力。研究表明,X 形桩的异形效应使得桩周侧表面积与圆形桩增大了 31%,作为一种摩擦桩,其承载能力可提高 24%,具有较高的性价比,已广泛应用于交通、市政、机场、水利等领域。此外,还有“Y”形桩,也是一种截面异形桩^[11]。

GRF(Geo-Reinforcement Foundations)是一种新型桩基础,首先开发于日本,近年来引入我国^[12]。GRF 桩基础是在桩的周围土中打入锚杆,通过锚杆将桩间土与桩连接为一个整体,从而改善桩—土之间的相互作用机制,达到提高承载力的目的。其特点表现在:①由于桩周土体中植入锚杆,桩周土体的承载力机制发生改变,桩的侧摩阻力得到大幅度提高,可提高竖向承载力 150%~180%;②由于锚杆的作用,GRF 桩的承载特性与传统桩有很大的不同;③施工不需要增加特殊的机具,只需要在原来的工序中加入施工锚杆即可;④由于锚杆的作用,GRF 桩的沉降幅度减小,承载力较大,采用较小的桩体即可满足工程需要,因此 GRF 桩适用于荷载大,允许沉降小的工程。

卢建平、曹国宁等^[13]在 2002 年介绍了一种新型桩基技术——现浇薄壁筒桩技术,该桩于 1995 年由浙江大学谢庆建教授根据浙江沿海软土地区和海岸工程的特点,按照省材、优质、高效、环境效益好的原则,在不断摸索研究、改进后提出。2012 年,河海大学刘汉龙教授为了克服传统能量桩的缺陷,开发了一种 PCC 能量桩,即现浇大直径混凝土管桩^[14],充分利用 PCC 桩的内部空间,储存导热液体,安置

导热管、集热器以及检查通道,可以说是“大直径筒桩”与能量桩的有机结合。现浇薄壁筒桩施工方法是先预制环形桩靴,桩靴上部凸出,下部呈环锥状,施工时把环形桩靴套入内外套筒之间,内外套筒的下端面与桩靴上部环形凸面的内外侧咬合,上部与压盖相连,内套管上部锥管穿过压盖插入施力压头与出泥孔导通;将桩靴尖头压入土层,按着振动下沉,在形成筒形孔的同时亦同步自动排出软土,然后放入钢筋笼,浇筑混凝土,拔出内外套管即成筒状桩基。一般情况下,薄壁筒状的外径可根据工程要求确定,筒桩壁厚为 0.2 m。该桩具有成桩速度快、工艺简单、成本低、承载力高、质量易于控制、污染少等特点,再结合刘汉龙教授开发的 PCC 能量桩,薄壁筒桩技术具有良好的应用前景。

张日红、吴磊磊等^[15]介绍的静钻根植桩有效解决了预制桩中存在的挤土、穿透硬夹层等施工难点、并有效提高了软土地基中预制桩的抗压、抗拔和水平承载能力。其施工过程可以概括为钻孔、扩底、注浆、植桩四个过程,集成了预制桩、灌注桩、水泥土搅拌桩以及扩底桩的优点,并可通过采用先进的施工管理装置使得施工全过程可视、可控,施工质量得到了有效保证。该桩通过桩周水泥土过渡为桩土接触面,有效提高了桩侧摩阻力和水平抗力;通过在桩端设置水泥土扩大头增大了桩端支承面积,提高了桩端阻力,土体的承载作用得到充分发挥,提高了桩身材料的利用率。

孔德志^[16]针对软土地区桩与土结合力小、桩身强度富余量大、材料利用效率比较低的现状,提出了一种具有很强的桩土咬合作用的新桩型——注浆成型螺纹钻孔灌注桩。该桩型是在传统钻孔灌注桩的基础上改进而成,通过改变桩土接触面,从而达到提高承载能力的目的。该桩首先利用传统钻孔灌注桩工艺完成钻孔,然后下入螺旋布置在钢筋笼外侧的土工织物布袋,灌注桩完成养护一定时间后,通过高压注浆设备向已布置完成的土工织物布袋内注入水泥浆,土工织物布袋扩张挤压钻孔灌注桩周围土体,最终在钻孔灌注桩周围形成水泥螺纹。与传统钻孔灌注桩工艺相比,注浆成型螺纹钻孔灌注桩需增加两个工序,一是在钢筋笼上螺旋缠绕土工织物布袋;二是在混凝土浇筑完成 8~12 h 后,通过高压注浆系统向土工织物布袋内注入水泥浆,使之膨胀扩张,产生螺纹体结构。试验表明,该桩比传统钻孔灌注桩可至少提高承载力 30%~40%,其工艺可靠,施工简单方便。

Kang I. K^[1]等对强腐蚀环境下桩的耐久性进行了研究并开发了一种用于强腐蚀地区的新桩型。混凝土和钢筋混凝土是最常用的材料,主要因为其具有优越的强度、耐久性和承受能力,但在恶劣的工程环境中混凝土和钢筋混凝土不宜使用,特别是具有腐蚀性和破坏性的海水,容易引起钢筋的腐蚀和混凝土耐久性退化。玻璃纤维增强塑性(FRP)具有优良的耐腐蚀、耐疲劳、重量轻等特点,而得到广泛的应用。为了提高桩基的耐久性和可施工性,开发了混凝土与FRP共同构成的新型桩——HCFPP桩。HCFPP桩首先将FRP材料挤压成型,其形状为具有内筒、外筒和肋的桩体形状,内部采用混凝土进行充填,桩的侧面用长丝FRP材料进行缠绕。作者通过单轴压缩试验研究了HCFPP桩的结构性能、荷载变形关系,并与有限元分析模型得到的结果进行了对比。

Perala A^[1]对聚合物桩进行了研究,并作为一种创新产品在轻型建筑物或构筑物上得以应用。聚合物桩是一个专利产品,是将高密度聚合物注入如土工袋内形成。注入聚合物时,桩的体积会膨胀到原桩尺寸的100倍。根据不同的地层条件,聚合物桩具有不同的作用机理,可作为摩擦桩,也可作为端承桩,用在松散的土中还具有挤压、置换作用。聚合物桩已经被用在世界的一些基础工程上,应用的国家有:英国、芬兰、瑞典、澳大利亚、新西兰、比利时、荷兰和德国,迄今为止已经有超过500个项目。

4 桩基施工技术的发展

桩基施工技术的发展除为保证桩的质量改进或发展的工艺方法外,施工技术有了新的发展,即节能减排的绿色环保施工技术。此外施工对周围环境的影响与安全研究也成为桩基施工技术研究的亮点。

楼明浩、汪炎法等^[17]为保证桩基施工中产生的泥浆能够得到合理处理和利用,达到节能减排的绿色环保要求,结合桩基施工泥浆处理系统,对上海市虹口区瑞虹新城3号地块项目的桩基施工泥浆进行净化、泥浆再生、泥水分离、固化处理和废水回收,有效解决了现场泥浆处理的难题,达到了节约材料和废浆处理成本,保证了文明施工的效果。经测试,通过对泥浆的净化、再生、固化处理,可降低泥浆处理费用30元/m³左右,降低整个预算费约14%。

张钦喜、陶 韬等^[2]通过试验研究了采用化学絮凝剂进行废弃泥浆固液分离的方法。该方法通过加入聚丙烯酰胺和生石灰实现了泥浆的快速泥水分离,处理后为松散土颗粒状态,便于运输,操作步骤

简便,处理周期快,有效改善了泥浆对环境的污染问题,且减少了处理成本。适用于施工产生的不同稠度的废弃泥浆处理。

范安平^[18]介绍了旋挖钻机节能控制技术,并用于实际工程。旋挖钻机是一种大功率的桩基础施工设备。由于自身功率大,负载高,所以节能性能的好坏直接影响到设备使用的经济性、寿命的可靠性。作者从节能控制技术角度出发,从旋挖钻机功率损失与旋挖钻机节能控制方法两个方面对旋挖钻机节能控制技术进行分析,以为旋挖钻机节能控制技术提升提供支持 and 借鉴。

沈保汉^[19]介绍了一种钻扩清一体机及其多节钻扩灌注桩施工方法。该机可实现集钻孔、多节扩孔和一次清孔于一身,设计灵活,扩大头腔稳定,节约投资。试验和研究表明,就灌注桩而言,在相同或相近的地质条件下,由钻扩清一体机施工成型的多节钻扩灌注桩,可比等直径钻孔灌注桩减小桩径、缩短桩长、减少桩的数量,从而大幅度降低桩基工程造价,具有显著的技术经济效益和环境效益。

胡晓虎、孙 浩^[2]介绍了一种大直径旋挖扩底灌注桩(OMR工法)成套施工工法,该工法利用专业化设计的旋挖钻机进行成孔,采用特制的全液压旋转抓斗进行扩底,并带有可视化监视电脑设备,全自动清孔设备(SCS清孔系统),智能超声波测孔设备进行桩基施工的系统性工法。采用OMR工法,扩底直径与桩身直径之比可达2.2,可大大提高桩的承载能力。OMR工法是从日本引进的先进成套施工工法,具有成孔速度快、质量高、成本低、无噪声、无振动、无环境污染、适用范围广等优点。

孙 浩、胡晓虎^[2]还介绍了一种用于超深超大直径扩底灌注桩的施工清孔方法,其简称SCS清孔系统。该系统放入孔底的清渣泵能有效振动孔底残渣,能够在直径(3 m以上)和超深度(80 m以上)的桩中快速完成清孔工作,孔底沉渣厚度可小于2 mm,可最大程度地保证桩端承载力的发挥和桩基施工质量。

黄吉龙、肖朝昀^[2]等研究了冲击成孔桩振动对竖井和排烟通道的影响。作者通过厦门翔安隧道五通侧冲孔桩冲孔振动对竖井和排烟通道的影响进行监测与分析,并结合冲孔振动的特点对萨道夫斯经验公式进行修正得出,当冲孔深度小于测点埋深时,冲孔振动衰减规律符合修正的萨道夫斯经验公式。当冲孔深度大于测点埋深时,经修正的萨道夫斯基经验公式预估结果与实测值偏差较大;成孔区与未成孔区存在空洞放大效应。约3.25 m处振动放大

系数为 2.0~3.0。冲孔振动各分量能量主要集中在 100 Hz 以内,且随冲孔深度的增加,冲孔振动主频也逐渐增加,且与岩性变硬有一定关系。在连续冲孔振动下,排烟通道内混凝土衬砌出现裂缝,宽度 0.2~0.3 mm,深度约为 5.6 cm。

5 结论与展望

本文通过对桩基础近年来发展的回顾,重点介绍了桩基础的设计、施工及桩基类型等方面的发展,总结这些发展,可以得到以下结论和建议。

1)数值分析与模拟技术已广泛用于桩基设计和桩基础特性研究方面,桩基设计方法更加全面、严谨、精确和科学。

2)随着计算机技术和机械制造技术的发展,桩基施工更加自动化、智能化和信息化。桩基施工技术也逐渐向绿色环保,节能减排的可持续方向发展。

3)在强腐蚀地区的桩基设计、施工应体现耐久性的理念,研究适应强腐蚀地区的桩基耐久性技术已非常必要与迫切。

4)从事桩基设计施工的技术人员应站在节能减排的大背景下,成为绿色桩基技术发展的贡献者。

参 考 文 献

- [1] Sous La. Proceeds of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C], volume 4, paris;2013.
- [2] 第十二届全国土力学及岩土工程学会论文摘要集[C]. 上海;2015.
- [3] 刘金砺,秋仁东,邱明兵,等. 不同条件下桩侧阻力端阻力性状及侧阻力分布概化与应用[J]. 岩土工程学报,2014,36(11):1953-1970.
- [4] 赵春风,李俊,邱志雄,等. 广东地区大直径超长钻孔灌注桩荷载传递特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(4):839-845.
- [5] 黄跃群,刘耀儒,杨松林. 复合桩基础桩-土-承台承载力特性分析研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(S2):1660-1663.
- [6] 王涛. 变刚度调平设计中桩基承载性状研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):641-649.
- [7] 秋仁东,刘金砺,高文生,等. 长群桩基础沉降性状的大比例尺模型试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(3):85-95.
- [8] 邵忠安,戴涛军. 大型 LNG 储罐试桩设计方法的中欧规范差异[J]. 油气储运,2015(6):649-652.
- [9] 林天健. 现代异形桩及其力学特点的理论评述[J]. 力学与实践,1998,20(5):1-11.
- [10] 王智强,刘汉龙,张敏霞,等. 现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(6):903-907.
- [11] 王新泉,陈永辉,刘汉龙. Y 型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(3):615-623.
- [12] 文松霖,徐文强. GRF 基础承载机制试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(增刊 1):35-40.
- [13] 卢建平,曹国宁,张志强,等. 新型桩基技术——现浇薄壁筒桩技术[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):704-707.
- [14] 刘汉龙,孔纲强,吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展及 PCC 能量桩技术开发[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):1-7.
- [15] 张日红,吴磊磊,孔清华. 静钻根植桩基础研究与实践[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):1200-1203.
- [16] 孔德志. 注浆成型螺纹桩施工工艺及承载特性试验研究[J]. 建筑施工,2014(12):1327-1329.
- [17] 楼明浩,汪炎法,孔奥. 桩基施工泥浆固化处理新技术在某工程中的应用[J]. 施工技术,2015(6):97-100.
- [18] 范安平. 旋挖钻机节能控制技术及其实际工程应用研究[J]. 硅谷,2015(4):92-93.
- [19] 沈保汉. 钻扩清一体机及其多节钻扩灌注桩施工工法[J]. 工程机械与维修,2014(3):106-114.

收稿日期:2015-09-09