

2011 HAIXIALIANGAN YANTUGONGCHENG/DIGONGJICHU JIAOLIUYANTAOHUI
DALUBUFEN LUNWENXUAN

2011

海峡两岸

岩土工程/土工技术交流研讨会
大陆部分论文选

中国建筑业协会深基础施工分会
王新杰 张晋勋 主编



知识产权出版社
全国百佳图书出版单位

2011 海峡两岸 岩土工程 / 地工技术交流研讨会 大陆部分论文选

中国建筑业协会深基础施工分会

王新杰 张晋勋 主编



 **知识产权出版社**
全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

2011 海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会大陆部分论文选/王新杰, 张晋勋主编. —北京: 知识产权出版社, 2011. 5

ISBN 978-7-5130-0512-8

I. ①2… II. ①王… ②张… III. ①岩土工程—文集
②地下工程—文集 IV. ①TU4-53②TU94-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 067771 号

2011 海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会

大陆部分论文选

主 编: 王新杰 张晋勋

责任编辑: 陆彩云

文字编辑: 石陇辉 夏 青 封面设计: 《基础工程》设计室

出版发行: 知识产权出版社

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

网 址: <http://www.ipph.com>

发行电话: 010-80771232 82000860-8101

责编电话: 010-82000860-8110

印 刷: 北京市兴凤印刷厂

开 本: 850mm×1168mm 1/16

版 次: 2011 年 5 月第 1 版

字 数: 450 千字

印 数: 1~3500 册

ISBN 978-7-5130-0512-8/TU·019 (3412)

邮 编: 100088

邮 箱: bjb@cnipr.com

传 真: 010-82000733

责编邮箱: lcy@cnipr.com

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 13.375

印 次: 2011 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

序

近二十年来，海峡两岸大规模的深基础工程实践促进了业内人士的技术交流研讨。由中国建筑业协会深基础施工分会与台湾财团法人地工技术研究发展基金会共同主办的“海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会”已经成功举办了七届，即北京（1992）、台北（1993）、西安（1994）、上海（2002）、台北（2004）、天津（2007）、台中（2009）。交流研讨会已经成为两岸深基础工程交流的重大盛会，对两岸岩土工程和地工技术界增进了解、加强友谊、发展技术、合作共赢带来了实实在在的效果，在两岸举世闻名的重大工程中，岩土工程/地工技术专家学者都铸创了非凡的成就，为伟大中华倍增光辉！

在草长鹰飞、繁花似锦的五月广州，海峡两岸岩土工程/地工技术又要举办第八届交流研讨会，大陆学者、工程技术人员热情期盼台湾同行的到来，积极支持本次盛会的召开，撰写论文百余篇。至三月中旬，大会论文征集日到期后，仍有一些稿件不断发来。论文编委会根据本次大会交流主题内容之相关性和篇幅所限，仅选择六十余篇专卷编入两岸论文之合册中。但考虑所余四十余篇及后续论文亦是近年大陆深基础工程领域典型案例研究、分析之智慧总结，实有展示给与会代表和广大业内人士之必要。在本次大会主席之一张晋勋博士的关心支持下，经过编委会和印刷出版方的努力，在本次大会论文合册本之外，又赶制编纂了“2011 海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会大陆部分论文选”，诚供大会代表、同行、专家、学者共享和指教。

当前，中国深基础工程技术发展方兴未艾，随着高速铁路建设，城市轨道交通（捷运）建设、各类桥梁和港口码头建设、江、河、海底隧道建设，以及高层建筑和深层地下空间开发建设，深基础工程托起了各项工程建设的重荷，既取得了举世瞩目的成就，也面临着更大更严峻的挑战。国家“十二五”规划纲要列出了大量新的富有挑战性的繁重建设任务，深基础工程界任重道远，自当再接再厉，不辱历史使命。

借 2011 海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会之际，向台湾同行致以敬意！向全体与会代表致以敬意！并真诚建议，在已成功举办多届的海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会基础上诚邀香港特区、澳门特区相关社团和全球华人专家学者共同参与，让交流之树根置于岩土大地，让交流之花遍于全球各地。

中国建筑业协会深基础施工分会

首席顾问 王新杰

2011 年 4 月

目 录

大陆地区桩基础施工技术发展动向	沈保汉	1
广州地铁工程范围岩土层物理力学参数区划	蒲 勇 姚 江 刘成军 程东海	7
岩土热响应测试及应用的几个问题的探讨	施恂根 康景文 曾思聪 苏 华 司子辉 康一亭	11
汶川大地震启示——对城市轨道交通、建筑设计的反思	王新杰 冯爱军 董更然	14
地铁车站结构诱导缝应用的现状与前景	隋 涛 杨林德 马险峰	21
“环套理论”在第四纪覆盖层活动断裂勘察中的应用研究	刘永勤 黄伏莲 庞炜 申 斌	25
地震荷载作用历程中 CFG 桩复合地基动力特性研究	胡 静 康景文	32
暗挖隧道下穿湿陷性黄土层既有建筑物沉降控制	邹冠尧 张海彬	38
自进式中空注浆锚杆在砾岩层中的应用	张利娜 熊 挺 李晋宝	43
地铁暗挖隧道初衬落拱的处理措施	刘金磊	47
地铁隧道人行地下通道设计施工优化	马长涛 刘玉龙 杨雨轩	51
地铁施工中地下水危害实例及对策	张冬林	59
深孔注浆在广州地铁五号线动水砂层中的应用	李 赞 郭景伟	63
浅谈地下工程防水问题	何金福	66
某地铁站深基坑险情控制及风险管理的思考	杨 骏 吴蔚博	69
中化-798 高渗透改性环氧化灌浆材在大坝地铁等工程中的应用	叶林宏	73
饱和软土层地铁车站连续自控化气压沉箱关键技术研究	吴群慧	77
浅谈地铁车站叠合墙结构拉筋设置问题	梁 剑 王 凌	85
桩锚支护+止水帷幕在临江复杂地质超深基坑中的应用	肖德君	88
某地区地铁盾构区间管片开裂成因分析	罗 坚 翟利华	92
软土地层盾构管片及配筋设计优化分析	刘建国 杨德春	97
盾构刀盘裂缝检验及修复技术浅谈	唐正茂 梁红兵	107
盾构穿越桥梁桩基的托换施工及其三维数值分析	马忠政 马险峰 徐前卫 王 磊	111
大开口率土压盾构在砂砾地层中的适应性研究	郭玉辉	120
盖挖逆筑法在武汉地铁 2 号线的应用	杜玉峰	125
型钢混凝土井字梁在地铁车站中的应用	周 斌 王 凌	131
地铁先隧后站新工法应用分析	廖 景	134
SMW 连续墙在威海大型基坑工程中的应用	王庆军 王凤灿	138
典型地质静压管桩施工技术	陈国清 徐情根 徐醒华 游永康 金永革	143
后压浆 CFG 桩复合地基设计与应用研究	张晓春 李金武 许 晖 紫 民	145

古建筑木结构祠堂的修缮设计与探讨	李伟良	吴如军	152
亚包大厦砂质软地基深基坑综合支护工程	王 罡	汪 蛟	史育童
地下室外墙与围护桩(墙)间隙注浆堵漏技术	谭代强	彭小林	钟显奇
典型地铁车站基坑土方施工技术	洪三金	蒋学文	165
多联体桩挡土墙施工技术	彭小林	钟显奇	170
石灰岩地区地下连续墙施工技术研究与实践	蒋学文	洪三金	174
西江引水工程巨厚砂层中钢板桩支护涌水涌砂的预防和应对	文 敏		180
地下工程防水混凝土质量控制与管理	李晋宝	张利娜	184
对工程安全监理工作的探讨	陈京利		188
控制地铁新线建设重大事故的探讨	郭建国		192
浅谈如何做好地铁建设安全监理工作	郭建国		200
“一次扣拱大断面暗挖逆作法”修建地铁车站新技术	黄美群		204

大陆地区桩基础施工技术发展动向

沈保汉

(北京市建筑工程研究院)

摘 要: 本文总结了最近二十几年来在中国大陆地区桩基础施工技术的一些发展动向: 桩的尺寸向长、大方向发展; 桩的尺寸向短、小方向发展; 向攻克桩成孔难点方向发展; 向低公害工法桩方向发展; 向扩孔桩方向发展; 向异型桩方向发展; 向埋入式桩方向发展; 向组合式工艺桩方向发展; 向高强度桩方向发展; 向多种桩身材料方向发展。

关键词: 桩基础; 施工技术; 发展; 动向

Abstract: In this article, the development trend in the last 20 years for pile foundation construction technologies in Mainland of China are put forward; the pile size is getting longer and bigger; the pile size is getting shorter and smaller; the pile is overcoming the difficulties in bore hole drilling; the pile is developing in a way for low environment pollution; developing toward reaming pile; developing toward special-shaped pile; developing toward embedded piles; developing toward combination type process pile; developing toward high strength pile; developing toward varied materials of pile shaft.

Keywords: pile foundation; construction technology; development; trend

前言

大陆地区幅地辽阔, 工程地质与水文地质条件复杂, 东部与中西部地区经济发展不平衡, 各类工程要求又不相同。大量施工实践表明, 大陆地区常用的各种桩型从总体上看具有以下特点: 大直径桩与普通直径桩并存; 预制桩与灌注桩并存; 非挤土桩、部分挤土桩和挤土桩并存; 在非挤土桩中钻孔、冲抓成孔和人工挖孔法并存; 在挤土桩中锤击法、振动法和静压法并存; 在部分挤土灌注桩的压浆工艺工法中前注浆桩与后注浆桩并存; 先进的、现代化的工艺设备与传统的、较陈旧的工艺设备并存等。由此可见, 各种桩型在大陆地区都有合适的土层地质、环境与需求, 也有发展、完善与创新的条件。

任何一种桩型都不是万能的, 都有其适用范围, 关键在于找到切入点, 扬长避短; 再好的桩型只要在施工中不注意质量或超过其适用范围, 就会出现质量问题甚至造成重大事故。

最近二十多年来, 桩基础施工技术在大陆地区, 至少有以下一些发展动向值得人们关注。

1 桩的尺寸向长、大方向发展

基于高层、超高层建筑物及大型桥主塔桩基础等承载的需要, 桩径越来越大, 桩长越来越长。欧美及日本的钢

管桩长度已达 100m 以上, 桩径超过 2500mm; 上海金茂大厦钢管桩桩端进入地面下 80m 的砂层, 桩径为 914.4mm; 温州地区静压式钢筋混凝土预制桩长度已达 70m 以上, 桩断面为 600mm×600mm。

大陆地区在大江、大河及海上修建的大跨径桥梁基本上均采用钻孔灌注桩, 而且桩径和桩长均在不断加大。长度超过 50m、直径大于 2m 的超长、大直径钻孔灌注桩已十分普遍。苏通大桥采用 131 根反循环钻成孔桩端压力注浆桩, 直径为 2.5~2.85m, 桩长 117m (2005 年)。南京长江二桥采用 21 根反循环钻成孔灌注桩, 直径为 3.0m, 桩长 83m (2001 年)。上海长江隧桥 B7 标反循环钻成孔灌注桩, 3.2~2.5m 变径桩, 桩长 115m (2006 年)。郑州黄河大桥采用旋挖钻斗钻成孔灌注桩, 直径 2.0m, 桩长 108m (2009 年)。

2 桩的尺寸向短、小方向发展

基于老城区改造、老基础托换加固、建筑纠偏加固、建筑物增层以及补桩等需要, 小桩及锚杆静压桩技术日趋成熟, 应用广泛。

2.1 小桩

小桩又称微型桩、IM 桩或树根桩, 是法国索勒唐舍 (SOLETANCHE) 公司开发的一种灌注桩技术。小桩实际上是小直径压力注浆桩; 桩径为 70~250mm (大陆地区多用 250mm), 长径比大于 30 (大陆地区桩长多用 8~12m,

长径比通常为 50 左右), 采用钻孔 (大陆地区多用螺旋钻成孔)、强配筋 (配筋率大于 1%) 和压力注浆 (注浆压力为 1~2.5MPa) 工艺施工。

小桩主要用于旧房改造、房屋增层、古建筑加固纠偏、防洪堤加固、建 (构) 筑物抗震加固、基坑开挖的护坡桩及水池底板抗浮等基础工程。

2.2 锚杆 (锚固筋) 静压桩

大陆地区自行研制开发的锚杆静压桩是锚杆和静力压桩两项技术巧妙结合而形成的一种桩基施工新工艺, 是一项地基加固处理新技术。加固机理与打入桩及大型静力压桩的加固机理类似, 受力直接、清晰, 但施工工艺既不同于打入桩, 也不同于大型静力压桩。锚杆静压桩的施工工艺是先在新建的建 (构) 筑物基础上预留压桩的桩位孔, 并预埋好锚杆或在已建的建 (构) 筑物基础上开凿压桩孔和锚杆孔用粘结剂埋好锚杆, 然后安装压桩架, 用锚杆做媒介, 把压桩架与建 (构) 筑物基础连为一体, 并利用建 (构) 筑物自重作反力 (必要时可加配重), 用千斤顶将预制桩段逐段压入土中, 当压桩力及压入深度达到设计要求后, 将桩与基础浇注在一起, 桩即可受力, 从而达到提高地基承载力和控制沉降的目的。

业内人士将这项施工工艺均称为锚杆静压桩, 笔者认为称为锚固筋静压桩为妥, 因为从上述施工工艺看, 连接件不是深基坑支护工程中所指的锚杆, 仅仅是锚固筋而言。

锚杆静压桩的断面为 200mm×200mm~300mm×300mm; 桩段长度视施工净空高度和机具情况, 取值为 1.0~3.0m, 桩入土深度 3~30m。

锚杆静压桩适用于老城区改造、旧基础托换加固、狭小空间场地施工, 对新建工程可采用逆作法施工。

2.3 微型桩 (迷你桩)

微型桩 (迷你桩) 是由一个内径不超过 300mm 的永久性的钢套管, 一个或一组位于桩孔中心起承重作用的钢筋及填充其间孔隙的水泥浆组成。桩体应以稍微小于套管的直径嵌入基岩。香港地区广泛应用的迷你桩多数为 219mm 直径的套管及 190mm 直径的嵌入体, 或 273mm 直径的套管及 235mm 直径的嵌入体组成。

微型桩对成桩设备及施工场地的要求低, 而承载力较高、安全可靠, 所以在香港得到了广泛的应用。其主要应用于隔音屏、行人天桥、运输带、小型别墅、小型商场等基础工程中, 也可以当支护桩使用。

微型桩可在陡峭的山坡、狭窄的楼群之间、行人路、高速公路、闹市区、火车站台甚至建筑物内进行施工。小型的施工设备只需要 2m×5m 的地方已经足够。

3 向攻克桩成孔难点方向发展

随着高层建筑、大跨度桥梁的发展, 嵌岩桩, 特别是

大直径嵌岩桩作为一种比较特殊的桩基类型, 20 世纪 90 年代在大陆地区得到了广泛的应用。嵌岩桩具有承载力高、变形小、整体刚度大的特点, 其沉降稳定时间短、沉降量小, 抗振性能好, 因此越来越受到工程界的重视。如何优质、高效、经济地施工这类桩孔则成为岩土钻掘工程界面临的首先要技术难题。钻孔直径大, 岩石强度高是其基本特征, 由此带来以下技术困难: ①单位体积岩石的破碎功随岩石强度的增加而增大, 单次破碎岩石所需要的临界破碎力亦增大; ②碎岩断面和碎岩量随桩孔直径增大而急剧增加; ③桩孔排渣性能的优劣直接影响各种嵌岩钻进方法碎岩的有效性。

大陆地区在大直径嵌岩钻进工法主要有: ①回转式工法: 牙轮/滚刀钻进法、钢粒环状钻进法、镶焊钎头的刮刀钻进法; ②冲击式工法: 纯冲击无循环钻进法、冲击反循环钻进法; ③冲击回转式工法: 气动/液动潜孔锤钻进法、可旋转式钢丝绳冲击钻头钻进法。

除上述岩层钻进成孔法, 大陆地区不少单位研究开发出大三石层 (大卵石层、大抛石层和大孤石层) 钻进成孔法。

4 向低公害工法桩方向发展

4.1 筒式柴油锤打入式桩三大公害

筒式柴油锤冲击式钢筋混凝土预制桩虽然具有桩身质量较可靠、施工速度快及承载力高等优点, 但由于施工时噪声高、振动大和油污飞溅 (三者统称为一次公害) 等缺点, 在城区的住宅群及公共建筑群等场地施工中受到很大限制, 为此静压式和变频变矩振动锤振入式钢筋混凝土预制桩施工技术在大陆地区得到业主的青睐。

4.2 静压桩

最近二十多年来, 静压桩在大陆地区软土地区 (温州、武汉及珠江三角洲等地区) 得到广泛应用。静压桩基础不仅适用于多层和小高层建筑, 还可用于 20~35 层高层建筑, 压桩机的生产和使用使桩基础施工技术跨进了一个新时代。大陆地区研制开发的系列静力压桩机是新型的环保型建筑基础施工设备, 具有无污染、无噪声、无振动、压桩速度快、成桩质量高等显著特点, 技术水平国际领先。静力压桩机有抱压式和顶压式两大系列, 压桩力从 800~12000kN。采用静压法施工的桩长已达 70m 以上。实践证明, 用步履式全液压、静力压桩机施工开口预应力管桩 (PC 桩) 和预应力高强度管桩 (PHC 桩) 是桩机和桩型的优化组合, 也是具有大陆地区特色的施工工法。

4.3 旋挖钻斗钻成孔灌注桩

泥浆护壁法钻、冲孔灌注桩在地下水位高的软土地区虽然被较广泛地采用, 但由于泥浆的使用造成施工现场不

文明及泥浆排除（称为二次公害）的困难，成为施工者头痛之事。因此，旋挖钻斗钻成孔灌注桩（即用旋挖钻机的钻斗钻头成孔而成的灌注桩），因其干取土作业加之所使用的稳定液可由专用的仓罐贮存，现场较为文明，在日本建筑业此类桩型已成为泥浆护壁灌注桩的主力桩型，大陆地区此类桩型的采用亦日趋增多。1998年8~12月，在北京某工地应用此桩型约为18000根，桩径0.8m、1.0m和1.2m，孔深12~15m，桩端进入砂砾石层0.5m。近十年来，青藏铁路、北京鸟巢（北京奥运会会场）工程及首都机场第三期工程等大量采用旋挖钻斗钻成孔灌注桩。

4.4 全套管钻孔灌注桩

贝诺特（Benoto）灌注桩施工法为全套管施工法。该法利用摇动装置的摇动（或回转装置的回转）使钢套管与土层间的摩阻力大大减少，边摇动（或边回转）边压入，同时利用冲抓斗挖掘取土，直至将套管下到桩端持力层为止。挖掘完毕后立即进行挖掘深度的测定，并确认桩端持力层，然后清除虚土。成孔后将钢筋放入，接着将导管竖立在钻孔中心，最后灌注混凝土成桩。贝诺特法实质上是冲抓斗跟管钻进法。

贝特诺灌注桩由于环保效果好（噪声低、振动小、无泥浆污染与排放）、施工现场文明，在海内外广泛采用，香港地区此类桩型的市场份额约占45%，昆明、温州及北京地区十余个工地已成功采用此类桩型。1999年上半年，北京某工地因杂填土层（含旧砖窑场地、块石及混凝土块等）过厚，深度8~23m，其他桩型无法施工，结果采用大陆地区生产的捷程牌摇动式全套钻机施工，历时4个月，顺利地完成了976根桩，桩径为0.8m、1.0m和1.2m，桩长为20~24m，穿越杂填土进入老土一定深度。从2001年起，在深圳、南京、杭州及天津等地近40个地铁车站中采用捷程牌全套管钻机施工咬合桩成功地取代地下连续墙，为业主节省大量造价。

4.5 长螺旋钻孔压灌桩

CFA工法桩可译为长螺旋钻孔压灌桩，在法、英、意、德、美等国比较流行。该钻机均由液压马达驱动，转距较大，采用混凝土泵车通过钻杆内腔直接灌注混凝土，在合适的地层和深度，施工效率一般为150~200m/d，目前最大钻孔直径达1200mm，最大深度为30m左右。主要生产厂家有德国宝峨、德尔麦克、意大利的土力及克萨格兰特等公司。

近二十年来北京、东北以及华北等地区都大力推广应用此工法，并有所创造和发展，形成4项发明和实用新型专利。

5 向扩孔桩方向发展

扩孔成型工艺有钻扩、爆扩、夯扩、振扩、锤扩、压

扩、冲扩、注扩、挤扩和挖扩等十大类型。

5.1 钻孔扩底桩

北京地区普通直径钻孔扩底灌注桩（桩身直径0.3~0.4m，扩底直径0.8~1.2m）的静载试验结果表明，与相同桩身直径的直孔桩相比，前者极限荷载为后者的1.7~7.0倍，前者的单位桩体积的极限荷载为后者的1.4~3.0倍。大直径钻（挖）孔扩底桩具有承载力高、成孔后出土量少、承台面积小等显著优点，在国内外得到广泛运用。大陆地区的钻孔扩底桩种类有20种以上，日本的大直径钻扩桩工法将近40种。

20世纪七八十年代日本大直径钻扩桩具有以下特点：①桩身直径和扩底直径大（最大直径为4200mm），桩长度大，单桩承载能力大，能适应高层建筑一柱一桩的要求；②扩底部置于细砂、中砂和砂砾层中，承载能力大，但扩底直径不能过大，扩底率较小，最大值为3.2；③大部分采用旋挖钻斗钻和反循环方式扩孔钻进；④液压扩翼机构占大多数；⑤施工管理制度严密，管理系统先进；⑥工法和机种的多样性。进入到21世纪后，上述前三个特点有所发展变化：①扩底最大直径为4700mm（Eagle工法）；②最大扩底率为4.94（Eagle工法）；③日本建筑中心从2007~2009年评定的13项扩底桩工法均采用旋挖钻斗钻扩孔钻进。

5.2 桩端压力注浆桩

桩端压力注浆桩是指钻孔、冲孔或挖孔灌注桩在成桩后，通常通过预埋在桩身的注浆管利用压力作用，将能固化的浆液（如纯水泥浆、水泥砂浆、加外加剂及掺合料的水泥浆、超细水泥浆、化学浆液等），经桩端的预留压力注浆装置（如预留压力注浆室、预留承压包、预留注浆空腔、预留注浆通道、预留的特殊的注浆装置等）均匀地注入桩端地层；视浆液性状、土层特性和注浆参数等不同条件、压力浆液对桩端土层、中风化与强风化基岩、桩端虚土及桩端附近的桩周土层起到渗透、填充、置换、劈裂、压密及固结或多种形式的组合等不同作用，改变其物理力学性能及桩与岩、土之间的边界条件，消除虚土隐患，从而提高桩的承载力以及减少桩基的沉降量。

桩端压力注浆桩的优点：①保留各种灌注桩的优点；②大幅度提高桩的承载力，技术经济效益显著；③采用桩端压力注浆工艺，可改变桩端虚土的组成结构，形成水泥土扩大头，可解决普通灌注桩端虚土这一技术难题，对确保桩基工程质量具有重要意义；④适应性广；⑤施工方法灵活，注浆设备简单，便于普及。

大量实测资料表明，与不注浆桩相比，桩端土层对后注浆桩承载力的提高值有着很大影响。桩端土层为粗粒土时极限承载力增幅在50%~260%范围，桩端土层为细粒土

时极限承载力增幅在 14%~138% 范围。进入 20 世纪 90 年代后, 桩的后注浆技术尤其是桩端压力注浆技术在大陆地区土木、建筑工程中得到蓬勃发展。

5.3 载体桩

载体桩是指由载体和混凝土桩身构成的桩。它采用柱锤夯击成孔、反压护筒跟进成孔的方法, 达到设计标高后, 分批向护筒内投入碎石和混凝土等填充料, 用柱锤反复夯实、挤密; 当满足设计要求的三击贯入度后, 再向护筒填入干硬性混凝土, 用柱锤夯实, 在桩端形成复合载体; 然后放置钢筋笼、灌注混凝土或直接放置预应力管节而成。当上部荷载传递到桩顶时, 荷载通过桩身传递到载体, 而载体由混凝土、夯实填充料和挤密土体组成, 从混凝土、夯实填充料到挤密土体材料压缩模量逐渐减少, 下一层对上一层来说是软弱下卧层, 当荷载传递到下层顶时, 应力被扩散, 从混凝土、夯实填充料到挤密土体, 压力逐渐被扩散, 降低, 传递到持力土层时, 压力小于地基土承载力, 满足承载力要求。与同桩长、桩径的普通混凝土桩承载力相比, 载体桩承载力提高 2 倍以上。因此土体的密实理论是载体桩技术的核心, 压力扩散理论是载体桩技术的受力原理。

载体桩的优点: ①由于在桩端处形成复合载体, 桩的承载性状好, 单桩承载力较高; ②在同一场地, 在不改变桩长和桩径的前提下, 可根据设计不同要求, 通过调整施工控制参数来调节单桩竖向承载力; ③夯扩体形状可控且边界较清楚, 施工质量易控制; ④填充料就地可取, 能可观地消纳建筑垃圾和工业废料, 环保功能好; ⑤采用锤击成孔跟沉护筒工艺, 由于细长锤在护筒中做竖直向下冲击时, 护筒起隔音罩作用, 可做到锤击时低噪声; ⑥锤击成孔跟沉护筒工艺简单直观; ⑦施工造价低; ⑧无泥浆排放; ⑨施工机械轻便, 机动灵活。

该项专利技术已在大陆地区 180 个中等城市推行专利代理制, 在数千项工程中推广应用, 年总产值已超过 10 亿元。

6 向异型桩方向发展

异型桩包括横向截面异化桩和纵向截面异化桩。

横向截面从圆截面和方形截面异化后的桩型有三角形桩、六角形桩、八角形桩、外方内圆空心桩、外方内异空心桩、十字形桩、X 形桩、T 形桩及壁板桩等。

纵向截面从棱柱桩和圆柱桩异化后的桩型有楔形桩(圆锥形桩和角锥形桩)、梯形桩、菱形桩、根形桩、扩底桩、多节桩(多节灌注桩和多节预制桩)、桩身扩大桩、波纹柱形桩、波纹锥形桩、带张开叶片的桩、螺旋预制桩、螺旋灌注桩、螺杆灌注桩、从一面削尖的成对预制斜桩及

DX 挤扩灌注桩等。

6.1 三岔双向挤扩灌注桩

三岔双向挤扩灌注桩又称多节三岔挤扩灌注桩, 简称 DX 挤扩灌注桩或 DX 桩。

DX 挤扩灌注桩是在预钻(冲)孔内放入专用的三岔双缸双向液压挤扩装置, 按承载力要求和地层土质条件在桩身适当部位, 通过挤扩装置双向油缸的内外活塞杆作大小相等方向相反的竖向位移以带动三对等长挤扩臂对土体进行水平向挤压, 挤扩出互成 120 夹角的 3 岔状或 3n 岔(n 为同一水平面上的转位挤扩次数)状的上下对称的扩大楔形腔或经多次挤扩形成近似双圆锥盘状的上下对称的扩大腔, 成腔后提出三岔双缸双向挤扩装置, 放入钢筋笼, 灌注混凝土, 制成由桩身、承力岔、承力盘和桩根共同承载的钢筋混凝土灌注桩。

DX 挤扩灌注桩的优点: ①单桩承载力高, 可充分利用桩身上下各部位的硬土层; ②成孔成桩工艺适用范围较广, DX 桩按不同成孔工艺可结合采用潜水钻机、正循环钻机、反循环钻机、冲击钻机、旋挖钻斗钻机进行泥浆护壁法成孔, 也可结合采用长螺旋钻机、旋挖钻斗钻机进行干作业法成孔, 还可结合采用贝诺特钻机进行全套管护壁法成孔; ③低噪声、低振动, 泥浆排放量减少; ④节约成本, 缩短工期; ⑤挤扩后盘、盆腔成形稳定而不坍塌; ⑥桩身稳定性好; ⑦抗拔力大; ⑧机控转角, 定位准确, 成桩差异性小; ⑨可实施成孔与挤扩装置的车载一体化, 挤扩效率高。

该专利技术已在大陆地区百余项工程中推广应用, 目前最大挤扩承力盘直径为 2550mm, 桩长 60m。

6.2 螺杆灌注桩

螺杆灌注桩的全称为半螺旋挤孔管内泵压混凝土灌注桩, 也可简称螺杆桩, 是一种由上部为圆柱形桩体, 下部为螺纹型桩体组合而成的变截面异形灌注桩, 其上下两桩段的长度可以根据地基土质情况而调节, 没有固定的比例, 下部螺纹桩体的外径与上部圆柱桩体直径相同。螺杆灌注桩是在螺旋灌注桩的基础上发展起来的。

螺杆桩施工机械与设备主要由螺纹——螺杆灌注桩机、强制式混凝土搅拌机、混凝土高压泵装置与管路系统、混凝土泵送车及导管系统等组成。

螺杆桩优点: ①环保效果好, 无噪声、无振动、无泥浆污染与排放; ②与普通钻孔灌注桩相比, 不存在清底、护壁、塌孔等问题, 也不易产生断桩和缩径等问题, 桩身质量可靠; ③桩身强度高, 承载能力高; ④施工程序简化, 降低工程造价, 施工效率高, 缩短工程施工工期; ⑤适用范围广, 不仅适用于普通混凝土的螺杆灌注桩, 也可应用于 CFG 桩复合地基和 CM 长短桩复合地基。

该专利技术已在数十项工程中推广应用。

6.3 大直径多节扩孔灌注桩

最近五六年来日本竹中工务店研究开发出大直径两节扩孔灌注桩。在某工地进行四根桩抗拔承载力试验,桩身直径均为1.0m,中间扩孔直径为1.4~1.7m,扩底直径为1.4~1.7m,桩长为8.0m、7.3m、7.4m和7.4m。桩身成孔采用旋挖钻斗钻工法,扩径部分成孔采用旋挖钻斗扩孔工法。

7 向埋入式桩方向发展

钢筋混凝土预制桩和钢桩的设桩工艺有打入式、振入式、压入式(静压式)和埋入式4种。前面提到筒式柴油锤冲击式(打入式)施工中存在一次公害。打入式、振入式和压入式设桩工艺在施工中产生挤土效应,使地基土隆起和水平挤动,不同程度地对邻近建筑物和地下管线产生不良影响。

为了消除一次公害和挤土效应,日本从20世纪60年代初期起开发出以低噪声、低振动和无挤土效应为目标的埋入式桩系列工法,至今共有90余种。所谓埋入式桩工法是将预制桩或钢管桩沉入到钻成的孔中后,采用某些手段增强桩承载力的工法。1987年在日本埋入式桩工法占预制桩施工的56%,至2000年该比例上升为78%。大陆地区埋入式桩的种类很少,几乎是个空白点,这也正是给桩基施工企业发展和上升提供良好的空间。最近几年来,埋入式桩在大陆地区也有所发展。

7.1 中掘施工法桩

中掘施工法桩是把小于桩径30~40mm的长螺旋钻,或钻杆端部装有搅拌翼片的螺旋钻及钻斗钻等插入桩的中空部,在钻头附近的地层连续钻进,使土沿中空部上升,从桩顶排土的同时将桩沉设。在施工中通常将桩端注入压缩空气和水,促进钻进的同时也使桩沉设顺利。为使桩获得更大的承载力,桩埋入孔中后可分别采用最终打击方式、桩端加固方式或扩大头加固方式。按中掘埋入工艺、钻机、承载力发挥方法及采用的预制桩种类等,中掘施工法桩又可细分为40余种桩型。最近两年来,广东地区也推出中掘施工法桩。

7.2 预先钻孔法桩

预先钻孔法,即边钻孔边排土然后将桩插入孔内,最后再将桩打入或压入孔内。为增大桩侧摩阻力,可在孔内预先填充砂浆、水泥浆、膨润土与水泥浆混合液等,然后将桩插入,以利用填充材料与地层间的摩阻力。

桩端承载力的发挥方法有最终打击或压入法、桩端水泥浆加固法、扩大头加固法和桩端作用特殊刀刃的回转法。

预先钻孔埋入式桩也可分为40余种。

最近十年来,日本基础界又推出近20种高承载力的埋

入式桩工法。2010年浙江宁波地区也推出高承载力埋入式桩工法。

8 向组合式工艺桩方向发展

由于承载力的要求,环境保护的要求及工程地质与水文地质条件的限制等,采用单一工艺的桩型往往满足不了工程要求,实践中经常出现组合式工艺桩。

例如,钻孔扩底灌注桩有成直孔和扩孔两种工艺;桩端压力注浆桩有成孔成桩与成桩后向桩端地层注浆两种工艺;预钻孔打入式预制桩有钻孔、注浆、插桩及轻打(或压入)等工艺。

9 向高强度桩方向发展

随着对打入式预制桩要求(如高承载力、穿透硬夹层、承受较高的打击应力及快速交货等要求)越来越高,普通钢筋混凝土桩(简称R.C桩,混凝土强度等级为C25~C40)已满足不了上述要求,故预应力钢筋混凝土桩(简称P.C桩,混凝土强度等级为C40~C80)和预应力高强度混凝土桩(简称P.H.C桩,混凝土强度等级不低于C80)使用越来越多。最近几年来,上海中技桩业公司开发出外方内圆的PS和PHS桩混凝土空心方桩,得到广泛应用。

9.1 PHC管桩和PC管桩

PHC管桩在欧美、日本、前苏联及东南亚诸地区大量采用。日本使用的预制混凝土管桩几乎均为PHC桩。1970~1992年间,日本管桩的年产量在520~830万吨之间。

最近十几年来,大陆地区管桩行业经历研制开发期、推广应用期、调整发展期和快速发展期等四个时期。以珠江三角洲和长江三角洲为基地,由南向北,由东向西,沿海沿江沿湖向内陆地区健康而快速地发展,在产品品种和产量上均达到世界前列。

到2010年大陆地区管桩生产企业超过300家,大陆地区管桩年产量超过3.0亿米。

9.2 离心成型的先张法预应力混凝土空心方桩(简称空心方桩)

空心方桩是一种近四五年来开发应用的新桩型,截面形状外方内圆,具有普通混凝土方桩和预应力混凝土管桩这两种桩型的特点和优点,其生产工艺更接近于管桩。分为预应力高强度混凝土PHS空心方桩,混凝土强度等级为C80和预应力混凝土PS空心方桩,混凝土强度等级为C60。

空心方桩比管桩有三点优越性:①外截面为方形比圆形更适宜堆放,另外方形截面比圆形截面更有利于接桩施工;②在相同横截面积的实体形状中,空心方桩的圆周长

最小;相同外周长时,空心方桩一般比管桩横截面减少12%~18%,这样对于以桩侧阻力为主的摩擦型桩(摩擦桩和端承摩擦桩),空心方桩占有优势;③相同的横截面积,空心方桩的截面抵抗矩比管桩增加7%~16%。

10 向多种桩身材料方向发展

以灌注桩为例,桩身材料种类亦出现多样化趋势,普通混凝土、超流态混凝土、无砂混凝土、纤维混凝土、自流平混凝土及微膨胀混凝土等。打入式桩亦有组合材料桩,如钢管外壳加混凝土内壁的合成桩等。

所谓钻孔压灌超流态混凝土桩是用改装后的长螺旋钻机至设计深度;在提钻的同时,通过钻杆内腔经钻头上的喷嘴向孔底灌注一定数量的水泥浆;边提升钻杆边用混凝土泵压入超流态混凝土至略高于没有塌孔危险的位置;提出钻杆向孔内放入钢筋笼至桩顶设计标高;最后把超流态混凝土压灌至桩顶设计标高而成桩。

11 结语

桩基工程具有以下施工特点:桩种多样性、竞争性、变异性、适用性、发展性及复杂性。作为桩基施工或桩工机械制造单位要成功地推出一种新桩型应做到以下几点:①具有精明的核心(该核心以科技为先导,把握桩基施工方向,有敏捷的经营理念;一个成功的核心,除了本身的技术能力外,必须具备领导的能力、沟通的能力、管理的

能力以及远见);②智慧的团队(该团队要聚集科研、施工、测试及经营各方面的优秀人才;该团队对社会的责任——守法奉献、尊重自然,对专业的责任——敬业守法、创新精进,对业主、雇主的责任——真诚服务、互信互利,对同事的责任——分工合作,承先启后);③诚信的经营(在推出新桩型时一定要实事求是、脚踏实地进行科研和开发工作);④严格的管理(推行全面质量管理,实行预防和改进为主的管理,做到“三全、一多样”,即全员、全过程、全企业的质量管理及信息化施工)。

参考文献

- [1] 龚维明,戴国亮,黄生根.大型深水桥梁钻孔桩桩端后压浆技术[M].北京:人民交通出版社,2009:1~2.
- [2] 周志道.锚杆静压桩:地基处理工程实例应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998:760~796.
- [3] 高翔.微型桩设计及施工[J].工业建筑,2003,33(6):31~33.
- [4] 平井芳雄,若井修一,佐藤英二,等.多节扩径混凝土灌注桩工法(日语)[J].基础工,2009,37(8):25~29.
- [5] 张雁,刘金波.桩基手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:9~10.

广州地铁工程范围岩土层物理力学参数区划

蒲 勇 姚 江 刘成军 程东海

(广州地铁设计研究院有限公司, 广州市地下铁道总公司)

摘 要: 通过对广州地区地形地貌、基岩地质、第四系形成年代、构造地质等的研究, 以岩土层物理力学参数均一性较好为原则, 对广州地区进行岩土层物理力学参数区划, 并结合广州地铁工程勘察成果对各分区岩土层物理力学参数进行了分层统计, 取得了较好的成果。

关键词: 广州地铁; 工程范围; 岩土层; 物理力学; 参数; 区划

Abstract: After researching into landforms and physiognomy, bedrock geology, formation age of quaternary system and structural geology in Guangzhou area with the principal of the preferable uniformity of physical and mechanical parameter of rock and soil layer, based on investigation outcome of Guangzhou metro engineering, layer statistic has been performed to the physical and mechanical parameter of rock and soil layer in each subarea and got ideal result.

Keywords: Guangzhou metro; engineering area; Rock and Soil Layer; Physical and Mechanical; Parameter; zonation

前言

岩土参数的选取对建筑工程的建设、安全和造价影响至关重要。影响岩土工程参数选取的因素很多, 有岩土层的类别、成因、特征、工程特点, 以及地区经验、勘察者水平等。

广州地区地质条件复杂, 成因类型和岩土种类众多且变化较大, 岩土结构复杂, 土质不均匀, 岩土层工程特性差异较大, 使得勘察中对岩土参数的取值难以把握, 取值时往往会出现误差和矛盾。本文在结合现有的地形、地质、前人研究成果等已有资料的基础上, 对广州市轨道交通多条线路勘察所积累的大量岩土数据进行了综合分析, 通过对广州地铁经过区域进行工程地质分区, 对岩土参数进行分区统计、归纳和研究, 总结出较为可靠的岩土参数区划, 为工程建设中各类岩土参数的选取提供参考, 并为广州市轨道交通建设及其他建筑、市政项目的规划选址、工程勘察和设计提供地区经验。

1 岩土层物理力学参数分区

1.1 广州地层

组成广州地区基底地层有元古界、古生界、中生界的地层, 其中震旦系、石炭系、白垩系、下第三系分布面积

较大, 泥盆系、二叠系、三叠系、侏罗系分布面积较少。

据文献 [1]、[2] 反映, 广佛地区地形地貌复杂多变, 河网密布, 且在中更新世以来经历了 6 次海进及其间的海退, 沉积类型与沉积相十分丰富, 要具体划分第四系地层的准确年代非常困难, 尤其是更新世与全新世更难以区分。总体上讲广佛地区的第四系盖层除缺少早期上新世 (Q1) 的沉积外, 更新世 (Q2~Q3) 与全新世 (Q4) 地层分布广泛。

1.2 岩土层物理力学参数区划

利用 1:10000 广州市区地形图、1:50000 广州市基岩地质图等结合相关的研究成果 [3]、[4] 和广州市轨道交通各条线勘察成果, 对广州地铁工程范围进行地质单元划分 (划分依据: 地貌、地层与岩性、地质构造、水文地质条件等), 编绘了广州地铁工程范围地貌分区图、基岩地质图、构造纲要图, 进而绘制广州地铁工程范围岩土参数区划图。

通过以上分析, 将广州地区划分分为五个大区, 即花岗岩、混合岩丘陵区, 石灰岩低丘、残丘区, 碎屑岩低丘台地区, 丘前、丘间谷地冲洪积、冲积平原区, 以及冲积、海积平原区, 再进一步结合工程地质条件分成不同的亚区。依据岩土层参数区划结果绘制了岩土参数区划图 (见图 1)。

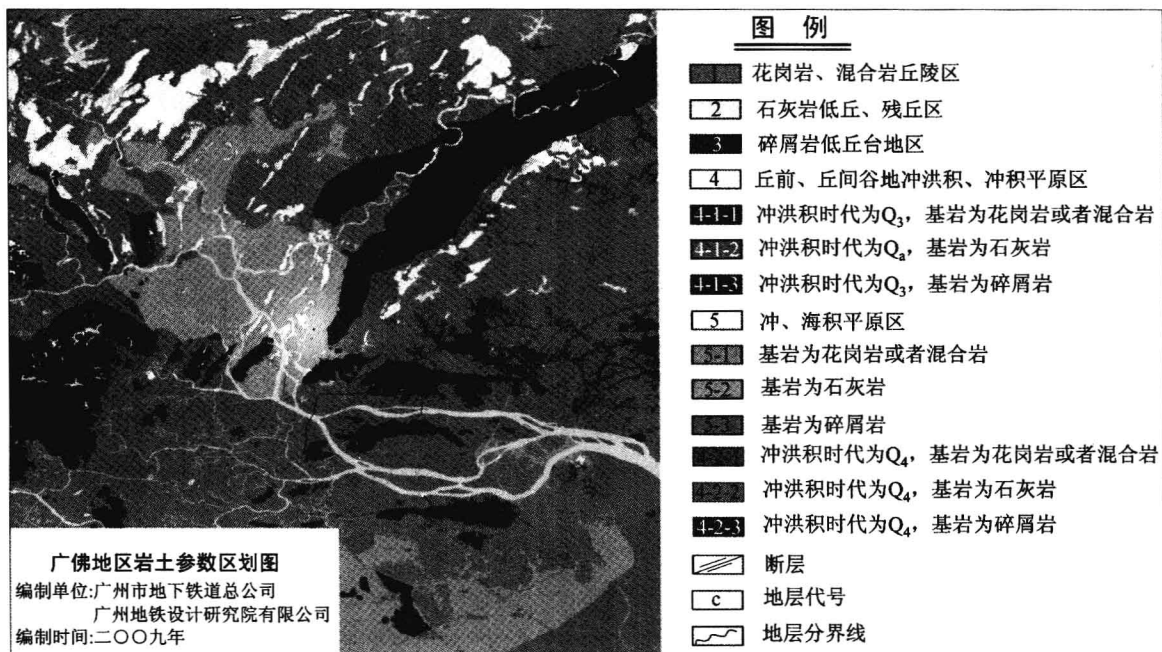


图1 广佛地区岩土参数区划图

2 岩土层物理力学参数统计

2.1 岩土参数的统计方法

岩土参数的统计按照先分区再统计的原则进行。

2.1.1 岩土参数的汇总

参数汇总时按层号、岩土类别和状态分别进行汇总,如冲洪积土层4-1层,分为黏土、粉质黏土、粉土,再按状态细分为硬塑、可塑、软塑、中密、稍密等分别汇总;岩石则按种类分别汇总,如碎屑岩分别按粗砂岩、中砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩等分别汇总。

2.1.2 统计指标

如果参与统计的样本数不足6个时仅统计样本数、最大值、最小值、平均值 f_m ;如果样本数超过6个时还需进一步统计标准差 σ 、变异系数 δ 、标准值(仅对强度指标统计标准值)。

2.1.3 异常值的剔除

样本的筛选,对关键参数进行检查,对每层土的液性指数、含水率、孔隙比等确定土的种类和状态的参数进行检查。如该参数与本层土的定名不一致时,则将这组样的所有参数均按异常值进行剔除。

三倍标准差剔除,对经样品筛选后的数据进行统计后,再按三倍标准差法剔除离散性大的参数。

在进行岩土参数汇总和统计的同时根据岩土层的特征和分布范围修正工程地质分区界线。

2.2 岩土参数统计结果的可靠性

2.2.1 岩土参数的来源

本文的岩土参数主要来自广州地铁各线、各阶段的岩

土工程勘察报告。勘察报告由具备资质的勘察单位完成,试验数据均出自具备资质的土工试验室,保证了岩土参数来源的可靠性和可追溯性。勘察成果包括试验数据经受了实践的检验。

2.2.2 岩土参数的样本数

本项目收集整理的岩土参数样本多达数万个,一般岩土层的试验参数均有几十个、几百个甚至上千个样本,大部分工程地质分区内有多条线路穿过,保证了试验数据的代表性和充足性。

部分工程地质区段土层发育较少,相应试验数据也较少。例如,花岗岩、混合岩丘陵区(1区),发育的砂层较少,相应样本数也少;冲洪积层粉细砂层(3-1)、冲洪积层中粗砂层(3-2)的样本数均在10个以内。同样,碎屑岩低丘台地区3区的砂层样本数量较少。

部分工程地质区段分布范围窄,经过的线路少,相应的室内试验的数据也偏少。例如,石灰岩低丘、残丘区(2区)仅六号线浔峰岗至横沙、三号线北延段永泰站两段穿过,除微风化灰岩(9C-2)的试验样本较多外,其余岩土层的样本数均较少。

2.2.3 岩土层物理指标统计结果的离散性分析

由于样本数量大,并在统计前对样本进行的筛选和异常值剔除等工作,从统计结果来看各岩土层的参数的离散性均较小,变异系数一般在0.3以内。具体如下:

1) 土层的稠度指标。土层的稠度指标中,大多数岩土层的变异系数在0.2~0.4,仅花岗岩风化层及残积层的液性指数的离散性较大,变异系数有的甚至超过1.0。原因主

要是：风化岩往往呈半岩半土状，Ⅰ级土样的采取困难，样品的扰动大，使其液性指数变化大；花岗岩风化残积土、风化岩中含有大量石英颗粒，室内稠度试验较困难，导致液性指数试验结果变化大。

2) 土的变形指标。土的变形指标压缩系数、压缩模量的统计变异系数在 0.2~0.4 内，离散性较小。

3) 力学性质指标。土层的力学性质指标包括粘聚力、内摩擦角（直接快剪、固结快剪、三轴）大部份土层的离散性较小，变异系数一般小于 0.3。但风化岩及花岗岩残积土的离散性较大，主要是因为样品中粗颗粒成分含量较大，试验时易卡住环刀出现异常。另外强风化岩包含的岩石状态较多，有土状、半岩半土状、碎块状等，能进行试验的仅为土状强风化岩，从而导致了强风化岩层的强度偏低，不能实际反映强风化岩的力学性质。

岩石抗压强度指标的变异系数均较大，部分岩性超过 0.3，反映了岩层的岩性、节理裂隙发育程度和岩石种类的变化较大，对岩层强度的影响也较大。

2.3 岩土参数分区统计结果的分析与对比

2.3.1 软土

通过对分布广泛的 5 区的三个亚区的淤泥、淤泥质土进行对比，发现含水量和孔隙比在不同区域有差别，一般在受潮汐影响的河流附近和砂层发育地段的淤泥的含水量和孔隙比较大。其他物理及力学指标相差不大，剪切强度指标（直剪、快剪）相差不大。

2.3.2 冲洪积土层

广州地铁分层系统中〈4-1〉层土的类别、性质、稠度状态复杂，本项目对该层土的土工试验参数进行统计分析时，按照黏土、粉质黏土和粉土三大类并按照稠度状态进行分层统计。通过对比可发现，对于坚硬~硬塑状态的冲洪积土，各区之间土的物理力学性质差别很大，总体上看，基岩为石灰岩和碎屑岩区（如 4-2-2 区、4-2-3 区、3 区等）的坚硬~硬塑状冲洪积土强度最高，基岩为花岗岩和变质岩（如 1 区、4-2-1 区）的坚硬~硬塑状冲洪积土强度最低。对于可塑~软塑状的冲洪积土，各区之间土的强度差异不明显。由此可见，从整体上看，广州地区冲洪积土层〈4-1〉很不均匀，坚硬~硬塑状土层强度差异明显，但可塑~软塑状土层强度差异不明显。

2.3.3 坡积土

对比 1 区、3 区、4-2-2 区、5-2 区〈4-3〉层残积土试验统计成果，可发现花岗岩、变质岩、石灰岩、碎屑岩坡积土剪切试验的内摩擦角很接近，其中直接快剪内摩擦角均在 19°左右，固结快剪内摩擦角在 21.2°~24.5°。从整体上看，灰岩坡积土粘聚力最大，花岗岩和变质岩坡积土次之，碎屑岩最低，且冲、海积平原灰岩坡积土的粘

聚力较冲洪积平原区要高约 9kPa。

2.3.4 残积土

从整体上看，从 3 区到 4-1-3 区、4-2-3 区，最后到 5-3 区，碎屑岩残积土的抗剪强度逐渐降低。5 区碎屑岩残积土的直接快剪和固结快剪的粘聚力都比其他各区明显高 5~7kPa，内摩擦角偏高约 2°。分析这一现象的原因，由 3 区至 5-3 区地势渐低，残积土埋藏深度在降低，相应地，土的含水量会逐渐减小，导致土的力学性质降低。这一观点可以通过比较各工程地质分区〈5-1〉、〈5-2〉的含水量及剪切试验指标加以印证。由此可见，碎屑岩残积土的抗剪强度与其含水量有直接关系。

根据基岩岩性对各区残积土进行对比，可以发现，无论是可塑状残积土还是硬塑状残积土，从整体上看，灰岩残积土的粘聚力>碎屑岩残积土的粘聚力>变质岩残积土的粘聚力>花岗岩残积土的粘聚力，而内摩擦角的关系则刚好相反，即花岗岩残积土内摩擦角>变质岩残积土内摩擦角>碎屑岩残积土内摩擦角>灰岩残积土内摩擦角，这与土层中粗颗粒含量有关。

3 结语

本文从地质参数区划的概念出发，统计了各地质分区的岩土参数，包括物理指标、变形指标的平均值、最大值、最小值及变异系数等，力学指标的平均值、标准值、最大值、最小值及变异系数等，其统计样本是充足的，统计过程是规范的，统计成果是真实的。

通过与有关规范、手册中提供的经验值比较，统计结果平均值、标准值在经验值范围之内，本研究成果可为后续的岩土勘察设计提供参考依据。但广州地区地形、地貌变化大，构造复杂，岩土种类众多，本研究项目不可能囊括所有岩土类别和成因类别的岩土类型，使用时应具体情况具体分析，结合室内试验，原位测试及地区经验对参数的合理性进行综合判断，提供更准确的岩土参数建议值。

对于砂层，由于较难采到原状土样，所以测试出来的天然含水量、强度指标等均不可靠，测试结果仅供参考，但砂土的颗分试验、水上、水下坡角系扰动土工试验得出，但砂层的成因类别复杂，受颗粒大小、级配等影响较大，因此砂层的参数仅能做参考，使用时需谨慎。

本研究成果主要据广州地铁岩土工程勘察成果统计、分析、归纳得出，对地铁工程沿线可能较准确，与本文题目相对应。其他地区仅供参考。

参考文献

- [1] 广东省地质调查院. 广州市城市地质调查可行性研究报告[R]. 广州: 广东省地质调查院, 2005.

- [2] 曾耀昌. 广州地区工程地质特征综述 [R]. 广州: 广东省岩土力学与工程学会, 2006.
- [3] 曾耀昌. 广佛地区工程地质区划图 [R]. 广州: 广州市地下铁道总公司, 2006.
- [4] 程东海, 蒋建军. 广州轨道交通工程岩土工程勘察的岩土参数取值方法 [J]. 广州建筑, 2006, 5: 1~5.
- [5] 程东海, 蒲勇. 广州地铁工程范围岩土层物理力学参数区划及岩土层地基系数研究报告 [R]. 广州: 广州市地下铁道设计研究院, 2009.

岩土热响应测试及应用的几个问题的探讨

施恂根¹ 康景文¹ 曾思聪¹ 苏 华² 司子辉² 康一亭²

(1 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司; 2 西华大学能源与环境学院)

摘 要: 岩土热物性参数是地源热泵系统设计的重要基础依据, 其准确程度决定着地源热泵系统运行的可靠性和经济性。本文介绍了岩土热物性测试设备构成及数据处理模型, 并对热响应测试的某些问题进行了讨论。

关键词: 地源热泵; 岩土热物性; 热响应测试

Abstract: The parameter of the rock-soil thermal properties is the significant foundation of design of the ground-source heat pump system. The right data decide the reliability and economy of the operation of the ground-source heat pump. This paper mainly introduces the structure of the rock-soil thermal response test and the model of data processing. Besides, some discussions of several issues of the test also have been made.

Keyword: ground-source heat pump system; parameter of the rock-soil thermal properties; rock-soil thermal response test

前言

岩土热物性参数包括地埋管深度范围内岩土的综合导热系数和综合体积比热, 是地源热泵系统设计的重要基础性依据。目前, 岩土热物性参数的获取方法有查表法、实验室测量法和现场测试法, 其中现场热响应测试得到的数据更能反映场地的实际情况, 因此国家标准 [1] 规定应进行现场热响应测试。

自 1983 年以来, 国内外许多单位研制出了岩土热物性参数测试装置^{[2]~[7]}, 我们根据工程需要, 在工程实践的基础上自主研发了一套热响应测试装置^[8], 同时还在实际应用中不断进行完善和改进。

1 现场测试装置及测试方法概述

1.1 热响应测试装置

主要包括循环系统(水泵、管路、调节阀门等)、加热系统(水箱、电加热等)、电控系统(总电源开关、水泵开关、加热器开关、24V 电源等)和测量系统(进出温度传感器、进出压力传感器、流量传感器、电功率传感器、数据采集模块、通信模块、计算机等)。

1.2 土壤原始温度测定

土壤原始温度必须首先测定, 可以用直接埋在土壤深处的铂电阻温度传感器测定, 也可以在不加热情况下只开启循环泵量测 U 型管水温, 作为岩土原始温度。

1.3 热响应测试

测定完土壤原始温度之后要开始热响应测试。通过加

热器以恒定热功率对水箱内的水加热, 使加热后的循环水以恒定的流量进入埋设在地下与周围土壤充分接触的 U 型管换热器进行换热。开始加热之时即以一定时间间隔(如 5min、10min)记录地下换热器 U 型管的进出口水温、流量、功率。

2 岩土热物性参数计算模型及选择

计算岩土热物性参数可采用线热源解析模型、柱热源解析模型以及三维数值模型。

2.1 计算模型

1) 线热源模型。在恒热流条件下, 利用线热源解析模型可得到流体平均水温 随时间的变化:

$$(1) \quad T_f = T_g + \frac{Q}{L} R_b + \frac{Q}{4\pi\lambda_s L} E_i \left(\frac{r_b^2 \rho_s c_s}{4\lambda_s t} \right)$$

其中 T_b 为孔壁平均温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_g 为土壤原始温度 ($^{\circ}\text{C}$);

Q 为换热孔热量; L 为换热孔深度 (m); R_b 为孔内热阻 (Ω); λ_s 为岩土导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $\rho_s c_s$ 为体积比热; $E_i(x)$ 为指数积分函数。平均水温 T_f 定义为换热器进口温度 T_m 与换热器进口温度 T_{out} 的平均值。

2) 柱热源解析模型。在恒热流条件下, 利用柱热源解析模型可得到流体平均水温 随时间的变化:

$$(2) \quad T_f = T_g + \frac{Q}{L} \left[G \left(\frac{\lambda_s t}{r_b^2 \rho_s c_s}, 1 \right) + R_b \right]$$

其中 G 函数计算见文献 [9]。

3) 三维数值模型。三维数值模型不但非常复杂, 包括