

# 类刚性 - 大直径水泥土(旋搅)桩在珠三角地区的应用和发展

卢信雅<sup>1</sup>, 吴厚信<sup>2</sup>, 周宏益<sup>3</sup>

(1. 广东珠荣工程设计有限公司, 广东 广州 510050; 2. 广东省地质建设工程集团公司, 广东 广州 510610; 3. 广东省物料实验检测中心, 广东 广州 510080)

**摘要:**类刚性 - 大直径水泥土(旋搅)桩是水泥土桩系列中的一种新桩型,其特有的有关造桩的科技成果已获得了众多工程专家的赞誉和社会的公认,并已在珠江三角洲地区推广应用。其中,最具持续发展意义的成果,则是可促进建筑工程实现低碳目标:即低耗、低噪、无污染施工。通过该桩型的一些实例,结合珠三角地区的地质特点,重点介绍了在含水量为 70% ~ 80% 的(欠固结)淤泥地层中,Ø1000 ~ 1200 mm 水泥土桩现场抽芯桩身强度 95% 达到  $q_{u(28d)} \geq 1.5 \sim 2.0$  MPa 的成果,以及“Ø1000 mm 水泥土桩穿透  $N \geq 38$  击粗(砾)砂层”的成果。

**关键词:**低碳化施工;大直径水泥土桩;类刚性桩;桩穿透能力

**中图分类号:**TU472.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 7428(2010)10 - 0089 - 04

**Application and Development of Rigid-like and Large Diameter Cement-soil Mixing Pile in the Pearl River Delta/** LU Xin-ya<sup>1</sup>, WU Hou-xin<sup>2</sup>, ZHOU Hong-yi<sup>3</sup> (1. Guangdong Zhurong Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510050, China; 2. Guangdong Geological Construction Engineering Group, Guangzhou Guangdong 510610, China; 3. Guangdong Province Material Testing Center, Guangzhou Guangdong 510080, China)

**Abstract:** The rigid-like and large diameter cement-soil mixing pile is a new pile type in cement-soil mixing pile series; its unique scientific and technological achievements have won the praise of many engineering experts and it was popularized and applied in the Pearl River Delta region with most significant outcome of sustainable development of low-carbon goal; low consumption, low noise and no pollution construction. By the examples of pile type and combining with the geological features of the Pearl River Delta region, the paper introduced that in the pile-site, the pile core-pulling strength of 95% Ø1000 ~ 1200 mm cement mixing piles reached to  $q_{u(28d)} \geq 1.5 \sim 2.0$  MPa in water content of 70% ~ 80% (due to consolidation) of sludge formation, and Ø1000 cement-soil mixing pile penetrated through  $N \geq 38$  hit rough (gravel) sand formation.

**Key words:** construction of low-carbon technology; large diameter cement-soil mixing pile; rigid-like pile; pile penetration ability

## 1 概述

珠三角地区软土主要指淤泥、淤泥质土,在广东省海、冲积平原区广泛分布(厚度较薄者 3 ~ 5 m,较厚者 20 ~ 30 m)。软土的主要特性一般是:含水量高,强度低( $f_{ak}$  只有 40 ~ 70 kPa),孔隙比大,变形模量低( $E_0$  为 0.8 ~ 2.0 MPa),压缩性高,受荷后沉降量大且不均匀,最终沉降量为厚度的 10% 左右,渗透性差,固结系数为  $10^3 \sim 10^5$  cm<sup>2</sup>/s,受荷后沉降速度缓慢,沉降持续时间可长达 10 ~ 30 a,灵敏度为 2 ~ 8,属中等灵敏性土,受强烈扰动土的结构破坏强度下降<sup>[1]</sup>。

在如此地层中,如何按现代变形控制理论和有关规范指标(表 1)进行设计是一个不可避免的理论难题。广东省标准《建筑基坑支护工程》(DBJ/T 15 - 20 - 97)已经制定了基坑支护工程“安全等级”(图 1)的量级指标。

珠三角地区的地层特殊性还在于在淤泥地层相

表 1 变形控制值

安全等级	支护结构水平位移	周围地面沉降变形
一级	0.002H 且不大于 30 mm	0.0015H 且不大于 20 mm
二级	0.004H 且不大于 50 mm	0.003H 且不大于 40 mm
三级	0.025H 且不大于 150 mm	0.020H 且不大于 120 mm

收稿日期:2010 - 09 - 10

**作者简介:**卢信雅(1942 - ),男(汉族),浙江海宁人,广东珠荣工程设计有限公司高级工程师,水文地质与工程地质专业,从事水泥土桩的应用研究工作,广东省广州市天河区天寿路沾益直街 19 号,lg\_office@sina.com;吴厚信(1941 - ),男(汉族),广东普宁人,广东省地质建设工程集团公司副总经理、高级工程师,矿产地质专业,从事岩土工程工作,广东省广州市云鹤南路 3 号大院 50 号 3007(510075),13902208721@163.com。

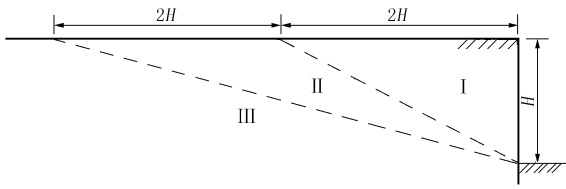


图1 基坑周围地段的扰动区分

对较薄或缺失的地段,尚有不少厚度不等的由粉细砂~中粗(砾)砂层构成的强透水层,其中,标贯击数  $N \geq 30 \sim 40$  击的致密砂层也并不少见。这类砂层的存在确实给各种建筑工程带来了许多不定因素,对于必须“隔水”的基坑支护工程施工带来了巨大的困难。

但是,源自于对饱和软粘土地层进行加固处理的“搅拌桩”——深层搅拌法(deep mixing method),以及专业进行“止水帷幕”施工的“旋喷桩”——高压喷射注浆法(jet grouting),在我国30余年的应用历史中,虽然在数量上得到了迅速发展,作为搅拌桩发展的一个重要指标,我国单轴搅拌的(常用)桩径(搅拌刀片尺寸)已从20世纪80年代起步时的  $d = 500$  mm,逐步发展至90年代的550、600、650、700 mm,却在有关“设计理论”、“施工工法”、“造桩设备”等方面并无实质性的进步,停留在当年的起步状态,存在着许多不可忽视的、确保工程质量的工法缺陷。如:标准桩径为  $\varnothing 500 \sim 600$  mm的传统“搅拌桩”,存在着在淤泥地层中有时成桩质量偏差,水泥土强度偏低,离散度很大;对于砂性地层则不能嵌入更不能穿透标贯击数  $N \geq 15 \sim 25$  击的各种砂(砾)层;超深大于18 m的淤泥和砂层未能有效进入等问题,因而不能适应当前工程对于变形控制的严格要求。以“高压喷射”传统工艺的“高压旋喷桩”,则必须采用大功率(总装功率大于120 kW)的设备施工,由于施工的需要,则因大量“喷浆、返浆”产生场地污染严重,也由于地下动水而造成成桩质量差而漏水涌砂等止水失效等问题,不但浪费了大量的能源和资源,反而更无“桩型”和“质量”可言,在“止水”工程中,事故频发,后果严重。

以“设备服务于工法”为研发宗旨的类刚性—大直径水泥土(旋搅)桩彻底地突破了传统“搅拌桩”、“高压喷射桩”等传统水泥土桩的工法和模式;彻底突破了“搅拌桩”“旋喷桩”之间的技术界限。创建了一套“设备简单、操作简单、监控简单”的,具有实用意义的“唯一可变量”工法,取得了以“大直径(标准桩径  $\varnothing 1000 \sim 1200$  mm)—高强度(类刚性)—强穿透能力”为特点的科技成果,走出了一条

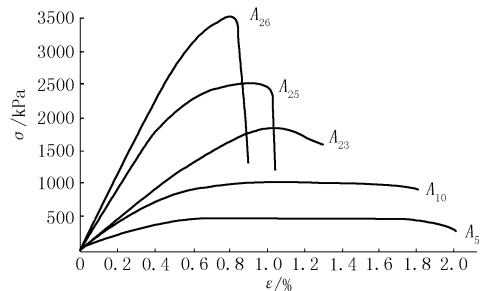
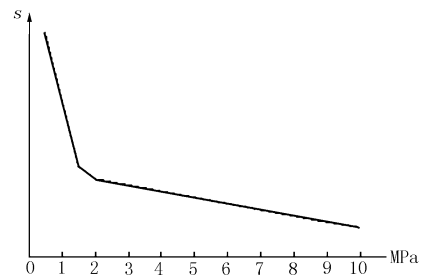
水泥土桩功能合一的发展和希望之路——“优质—环保—低碳的科技创新之路”。

经过多年的研发和实践,类刚性—大直径水泥土(旋搅)桩以其不断创新的科技成果,已经形成了相当规模的生产能力,已经形成了一批达到“一级基坑”指标  $s \leq 30$  mm 的水泥土支护墙和“建筑沉降  $s \approx 0$ ”的地基基础工程,获得了社会的公认和众多工程专家的肯定。

## 2 “类刚性”强度定义的理论依据和工程意义

在类刚性—大直径水泥土(旋搅)桩的科技成果中,高强度“类刚性”定义具有非常特殊的理论和工程意义,所有以上介绍的由水泥土桩构成的“一级基坑”和“建筑沉降  $s \approx 0$ ”工程,均具有类刚性材料特性。

水泥土材料的强度特点是随地层条件的不同而变化很大,具有在淤泥地层中的强度很低;砂层中的强度较高的普遍规律。所以,传统的习惯以及有关规范均以“半柔半刚”作为对水泥土材料的宏观表达。但是,在实际的工程设计中,不分“柔”“刚”而采用同一“公式”验算的变形控制设计的问题很多,因为“柔”与“刚”的材料之间,即“塑—脆性”材料之间的应力—应变的理论差距甚大(图2),其结果的差距也很大——柔性桩并不适宜进行变形控制设计(图3)。

图2 水泥土的应力—应变曲线<sup>[2]</sup>图3 某水泥土墙基坑支护工程强度—侧向变形曲线  
(墙外弯矩  $2100 \text{ kN} \cdot \text{m}$ )

根据以上理论和实际资料的综合分析,可以认

为在以变形控制为目标的现代工程设计中,在“柔”和“刚”之间设置一个界定值,以在设计的过程中充分考虑到材料特性的影响是很有必要的——将  $q_u = 1.5 \sim 2.0 \text{ MPa}$  作为“柔”和“刚”之间的“模糊”界定(在软土或粘性土中取低值;在一般土层中取高值)具有可供实际应用的工程意义。

但是,在对水泥土材料进行“柔”“刚”有别的界定中,也应该充分考虑到其“刚”的变形特征与典型的“刚性”材料(混凝土)相比,应力-应变特性的差距仍然很大,相同强度的变形模量  $E$  的差距很大,在变形控制的设计中,还不能混为一谈。因此,对于强度  $q_u \geq 1.5 \sim 2.0 \text{ MPa}$  的水泥土材料,比较恰当的理论定位应为“类刚性”材料,以与经典的刚性材料定义相区别。

据上分析,水泥土强度达到“类刚性”水平,是水泥土材料进行变形控制设计的“必须条件”。以上“必须条件”,在地基基础工程中很容易直接应用——当桩身强度达到类刚性桩(1.5 MPa)水平时,可承担 500~600 kPa 建筑荷载的应变量为  $\varepsilon = 0.1\% \sim 0.15\%$ ,而且在桩端地层可靠时,有足够的(桩身强度)安全储备,有利于进行使建筑沉降  $s \approx 0$  的变形控制设计。

但是,对于基坑支护工程,仅有以上“必须条件”是不充分的,因为,类刚性水泥土墙(脆性)破坏的基本状态,往往是一种“截面内”和“截面外”(水平方向)的搭接缝之间的剪切破坏,所以在工程实际中,必须重视“墙顶钢筋混凝土盖板”的施工质量和盖板-墙体间的连接质量,并将“墙顶盖板”所具有的(冠梁)支锚刚度,作为一个“墙顶支座”进入设计验算——建立一个水泥土支护墙的“四边支撑”结构模型(图4)进行验算,才能使变形控制-拉应力控制-抗倾覆稳定性控制的验算值,同步满足规范要求,并与实测值基本相符。按“四边支撑”模型进行变形控制设计实例之一的某深基坑支护工程(图5),开挖深度  $h = 7.20 \text{ m}$ ,格构墙体宽  $b = 2600 \text{ mm}$ ;实测变形量  $s_{\max} = 13 \text{ mm}$  与验算值  $s = 9 \sim 18 \text{ mm}$  基本吻合。

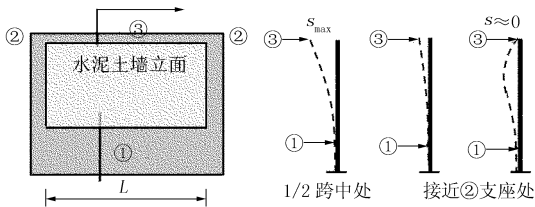


图4 “四边支撑”结构模型

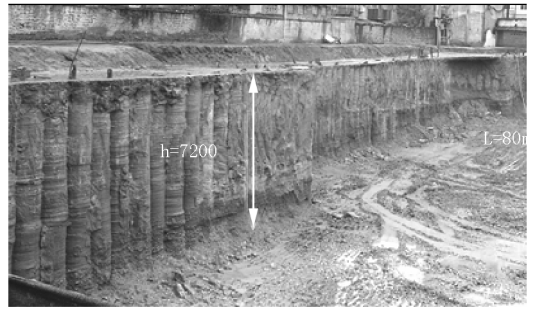


图5 某深基坑支护工程

从以上论述和实际工程的应用可知,水泥土墙“四边支撑”模型实际是一种(类刚性-水泥土重力式支护墙)控制抗倾覆稳定性—控制截面变形—控制墙内外弯矩转移的空间结构体系的简化—可以简单的采用截面验算方法(理正结构5.0)进行变形-拉应力控制设计,具有相当的理论基础和经验性,具有相当的实用意义。

### 3 垂度控制下的强穿透能力

在基坑支护工程中的一项专业课题是“在强透水砂层中,必须隔断坑内与周边环境的水力联系”,形成“止水帷幕”,特别是在现代城市建设中的深基坑工程,已发展为2~4层地下室的深度,“止水帷幕”的工程质量显得尤为重要。传统的搅拌桩方法、搅拌桩叠加旋喷桩方法、旋喷桩(包括桩间旋喷)方法均因各种原因而存在“失败风险”很大的问题。

类刚性-大直径水泥土(旋搅)桩对于上述难题,在小功率设备(总机设备功率约为50 kW)的条件下,成功的穿透了各种强透水或深厚砂层(包括卵-砾砂层),并以小于规范值的垂度控制水平(约0.5%),形成了专业风险最小,工程质量可靠,性价比最高的专业“止水帷幕”。

图6为广州市康王路商业综合楼基坑支护采用Ø1000大直径(旋喷)搅拌桩形成止水帷幕桩身抽

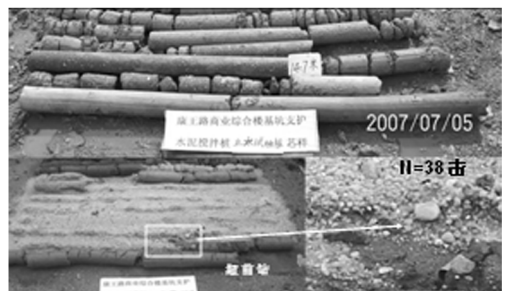


图6 广州市康王路商业综合楼基坑支护 Ø1000 大直径(旋喷)搅拌桩桩身抽芯成果

芯显示其芯样长度  $>1$  m,成功的穿透了强透水层;图7为华南国际金融中心基坑支护采用  $\varnothing 1000$  大直径(旋喷)搅拌桩形成止水帷幕桩身抽芯显示成功穿越 20.50 m 中粗砂层并进入不透水层 0.5 m,基坑坑底干燥。



图7 华南国际金融中心基坑支护  $\varnothing 1000@750$  大直径(旋喷)搅拌桩桩身抽芯成果

## 4 结论

### 4.1 关于桩身强度

历史的事实(在淤泥地层中离散性极大的水泥土强度最高值可达  $3 \sim 5$  MPa)告诉我们,在淤泥地层中传统搅拌桩的水泥土强度“低值”的提高不是“不可能”而是未解决“搅拌均匀”的工法问题——径向和轴向的搅拌均匀问题。因此类刚性-大直径水泥土(旋搅)桩的类刚性强度成果,工艺的核心是搅拌均匀,使离散性从  $0 \sim 5$  MPa 进步为“达到 1.5 MPa 或以上的可能性为 95%”。

### 4.2 关于穿越能力和成桩垂直度控制成果

对于“止水帷幕”专题,具有强穿透能力,可穿越标贯击数  $N \geq 30 \sim 40$  击的致密砂层,此外还必须强调采用“大直径”方法的理由是搭接风险最小,只有在大直径条件下,才可能具有“垂度可控、搭接可靠”的效果。

但是,传统的钢筋混凝土“排桩”支护体系+“止水帷幕”方案,也还存在着比较复杂的不同性质的桩型,交叉施工相互限制和甚至被破坏的问题。所以类刚性-大直径水泥土(旋搅)桩已有的新发

展为“(类)重力墙止水帷幕”以及“水泥土加劲墙止水帷幕”等多种兼具支护、止水双重功能的支护方案;其中“(类)重力墙”的特定含义是墙体厚度较小(一般为  $b = 2600$ ),当开挖深度  $h \geq 7$  m 时,其  $b/h \leq$  规范值 0.4。

### 4.3 关于施工设备的低碳成果

本文特别强调类刚性-大直径水泥土(旋搅)桩是一种低碳科技的时代需求,源自于类刚性-大直径水泥土(旋搅)桩的施工设备的单(轴)搅拌成桩全电动机械,总装功率仅为 50 kW 左右;特大功率(桩径 1800 mm 或桩长 35 m)也仅为 65 kW 左右,同时可以有效地控制“翻浆”浪费,所以无论在设备制造和施工的过程中,均达到了低排-低碳成果。

### 4.4 应用和发展前景

类刚性-大直径水泥土(旋搅)桩经过多年的研发和实践,以其不断创新的科技成果,已经形成了有一定规模的生产能力,在珠三角地区场地存在深厚淤泥、淤泥质土、砂、砂砾层工程中被普遍应用,实现了在淤泥、淤泥质土成桩桩身强度大,在砂、砂砾层中穿透能力强,垂度可控、搭接可靠、低消节能、降低成本、止水帷幕效果好,值得在一定地区内扩大应用和进一步改进发展。

## 参考文献:

- [1] 林本海,杨树庄,朱伯善,等.广东省地质构造与岩土工程基本特征[J],岩石力学与工程学报,2006,10(S2):3337-3346.
- [2] 曾国熙.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [3] [美]H·F·温特科思.基础工程手册[M].方晓阳,钱鸿绍,叶书麟,等译.北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [4] 沈杰.地基基础设计手册[M].上海:上海科学技术出版社,1988.
- [5] 史佩东.实用桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [6] JGJ 79-2002,建筑地基处理技术规范[S].
- [7] 胡运杰,卢信雅.大直径搅拌桩在地基加固中的发展[M].湖南长沙:湖南大学出版社,2002.60-70.
- [8] JGJ 120-99,建筑基坑支护技术规程[S].
- [9] 吴厚信,陈国勇,周宏益,等.大直径深层旋喷搅拌桩在昊胜大厦深基坑支护工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(4):58-61.