

岩土工程新技术及工程应用丛书

灌注桩后注浆技术 及工程应用

张忠苗 等著

中国建筑工业出版社

岩土工程新技术及工程应用丛书

灌注桩后注浆技术及工程应用

张忠苗 等著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

灌注桩后注浆技术及工程应用/张忠苗等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009

(岩土工程新技术及工程应用丛书)

ISBN 978-7-112-11110-7

I. 灌… II. 张… III. 钻孔灌注桩-技术 IV. TU753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 112332 号

本书系统阐述了灌注桩后注浆技术的基本原理与设计施工方法及应用效果。全书共分 8 章, 分别介绍了钻孔灌注桩存在的问题及后注浆技术的定义、作用、分类及研究现状; 钻孔灌注桩的施工方法、受力机理与群桩沉降计算方法及影响钻孔灌注桩承载性状的众多因素; 灌注桩岩土注浆理论及桩端后注浆提高承载力减少桩沉降量的机理; 室内注浆水泥土力学试验、细观机理及室内注浆模型桩试验等; 注浆桩现场静载试验分析; 桩端后注浆桩的设计施工方法及实例; 桩侧后注浆桩设计施工方法及实例; 注浆锚杆桩、注浆树根桩、预制桩注浆、大直径钻孔空心注浆桩等注浆方法与施工实例。书末还附有《浙江大学灌注桩后注浆技术规程》及 600 多根注浆桩的试验数据, 内容丰富。

本书既可作为高等学校土木工程、水利工程、港口工程、道路工程、桥梁工程等专业学生的参考书, 又可作为我国建设工程领域大量工程技术人员的应用参考书。

* * *

责任编辑: 王 梅 咸大庆

责任设计: 张政纲

责任校对: 兰曼利 陈晶晶

岩土工程新技术及工程应用丛书
灌注桩后注浆技术及工程应用
张忠苗 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 27¼ 字数: 680 千字

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-11110-7
(18359)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序 一

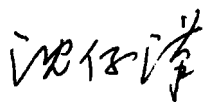
万丈高楼平地起，基础必须要牢固，桩基础是建筑工程、桥梁工程、港口工程和海洋工程的主要基础形式之一。灌注桩是桩基础中的主要桩型，在高层建筑和大型构筑物中广泛应用。但由于灌注桩存在沉渣难清理干净和泥皮问题及桩身质量问题，在工程应用中也有失败案例并带来建筑物的过大沉降及不均匀沉降问题。为此，灌注桩桩端后注浆技术应运而生。桩端后注浆通过先钻孔且在成孔后下放钢筋笼时预埋注浆管灌注混凝土成桩，再在桩身混凝土达一定龄期后打开预埋注浆管开塞注入水泥浆。它既能提高桩端阻力和桩侧阻力，又能减少群桩累计沉降量及避免不均匀沉降，所以是一项先进的桩基新技术。该技术在浙江省及全国已有许多成功的应用实例，但系统介绍的书籍很少。张忠苗教授从事桩基工程理论与实践研究二十多年，一贯坚持求实作风和求是精神。坚持理论研究—现场试验—工程实践相结合，于1992年开发了打孔包扎注浆头注浆成套技术，亲自负责完成了对二十多个桩基工程的大面积注浆实践任务，摸索出了不同地层的群桩注浆经验规律，并参与了浙江省几百项包括最高建筑在内的桩基础设计咨询与测试任务，同时完成收集积累了600多根注浆桩（亲自做了300多根并收集了300多根）的承载力对比试验和5000多根灌注桩的现场静载试验，建立了试验数据库。与此同时，在实践积累基础上带领课题组开展注浆水泥土室内物理力学试验、模型桩试验、扫描电镜试验及可注性理论、球柱扩张理论、有限元计算等方面研究，系统地揭示了岩土体注浆前后的细观机理及注浆提高桩承载力、减少群桩变形量的力学机理，并给出了桩端（侧）后注浆的合理设计方法和施工工艺。本书既有理论研究成果，又有大量的注浆实例分析，它是浙江大学长期对桩端（侧）后注浆技术研究的理论与实践经验的系统总结。必将对我国桩端后注浆技术的进一步推广应用起到积极的推动作用，为国家的建设事业进一步作贡献。

曾國照

2009年1月5日于浙大求是园

序 二

钻（冲）孔灌注桩是建筑工程、交通工程、水利工程及海洋工程桩基础中的主要桩型，其优点是地层适应性强、桩长桩径可按设计灵活选用、单桩承载力大、无挤土效应，所以应用广泛。但是，钻孔灌注桩有两大症结：孔底留有难于清理干净的沉渣；孔壁留有难于剔除的泥膜，不仅较大幅度降低单桩承载力，而且影响其进一步推广使用，此外，还因单桩承载力离散性较大并由此带来建筑物产生较大沉降及不均匀沉降问题。为此，钻（冲）孔灌注桩桩端后注浆技术被开发出来。桩端后注浆技术顾名思义就是先用钻机成孔，然后在下放钢筋笼时预设注浆管，再灌注混凝土成桩，最后在桩身混凝土达一定休止期后用高压注浆泵打开预埋注浆管开塞向桩端（侧）地基土层注入能固化的浆液。该技术不仅可提高单桩竖向极限承载力，而且可减少群桩基础累计沉降量。该技术在国内外由北京市建筑工程研究所和中国建筑科学研究院地基基础研究所最早开发，并在全国各地建设工程钻（冲）孔灌注桩基础中得到成功应用。张忠苗教授从事桩基工程理论与工程实践二十多年，一贯坚持求实作风，并结合浙江软土地基特点开发出打孔包扎注浆头注浆成套技术，在完成了多项桩基工程的大面积钻孔灌注桩注浆任务后，摸索出了软土地基中不同地层的群桩注浆规律，并参与了浙江地区一些重大重点工程桩基础设计咨询与测试任务，还积累了600余根注浆桩的承载力对比试验资料和5000余根钻孔灌注桩的现场静载试验资料，建立了试验数据库。与此同时，张忠苗教授还带领研究生和技术人员开展注浆室内试验、理论研究和工程实践等工作，揭示了不同持力层钻孔灌注桩桩端（侧）注浆后提高桩承载力、减少群桩变形量的力学机理和微观机理，并给出了桩端（侧）后注浆的合理设计方法和施工工艺。本书内容丰富翔实，它是作者对我国长期以来开展桩端（侧）后注浆技术研究的总结，必将对我国桩端后注浆技术的进一步推广应用起到积极的推动作用，并促进桩基工程学科的发展。



2009年2月5日于北京

前 言

近 30 年来,随着我国城市化进程和大交通迅速发展,高层建筑和大型构筑物遍地开花。而其基础多采用桩基础,特别是灌注桩基础应用广泛。因此,如何安全而经济地设计施工好桩基础是一项十分重要的课题。桩基设计的指导思想是在确保长久安全的前提下,充分发挥桩土体系的力学性能,做到既经济合理,又施工方便、快速、环保。但目前我国灌注桩应用还存在一些问题,如桩端沉渣处理问题、桩侧泥皮问题、桩身质量问题。某些房屋基础由于灌注桩设计、施工不当导致产生过大沉降或不均匀沉降,给国家和人民造成了巨大的经济损失。因此,完善基础工程中灌注桩的设计施工技术就成为十分紧迫的任务。灌注桩后注浆技术就是在此背景下提出的一项新技术。

桩端(侧)后注浆是指钻孔灌注桩在成桩后,由预埋的注浆通道用高压注浆泵将一定压力的水泥浆压入桩端土层和桩侧土层,通过浆液对桩端沉渣和桩端持力层及桩周泥皮起到渗透、填充、压密、劈裂、固结等作用来增强桩端土和桩侧土的强度,从而达到提高桩基极限承载力,减少群桩沉降量的一项技术措施。试验表明:通过对合理的桩端(侧)后注浆,可明显提高桩端阻力和桩侧阻力,同时可减少桩基累计沉降量,避免群桩的不均匀沉降(经调查,浙江省采用桩端后注浆的约 50 幢高层建筑竣工累计沉降量一般小于 25mm)。因此,该技术对主楼裙楼地下室一体建筑可以不设沉降缝;对高速列车、医院大楼等对累计沉降要求严格的建筑尤为必要与重要;对控制桥梁工程不均匀沉降也很有必要,它不但提高抗压承载力,还提高抗拔力和抗水平承载力。据浙江省统计,后注浆技术已在大直径灌注桩施工技术应用率达到 50% 左右,该技术有效地保证了建(构)筑物的长久安全运行。同时,由于该技术只是在下钢筋笼时多下 2 根注浆管且在成桩一定龄期后注水泥浆,所以注浆增加的费用只是注浆管费用及水泥费用,它占灌注桩施工造价的比例很少,经济效益明显。而且桩端注浆一般在打桩快结束时穿插进行,几乎不增加工期。因此,桩端后注浆技术以能有效提高桩基整体承载力,减少群桩沉降量且经济社会效益很明显而得到越来越广泛的应用。中国建筑科学研究院地基所(尤其是刘金砺教授为我国桩基技术的发展作出了杰出的贡献)、北京建筑工程研究院、西南交大、浙江大学等单位都做了许多工作。但是目前工程应用与理论研究还存在着一些脱节,尽管灌注桩桩端后注浆技术已应用较广,但迄今为止有关系统地阐述该项技术及机理的书很少,这是笔者编写此书的主要理由。笔者从事桩基工程研究已二十多年,从事灌注桩后注浆技术与教学已近 20 年。笔者坚持求实的作风和求是的精神,坚持上工地现场第一线亲身感受,亲自试验。早在 1984 年秋,笔者在浙江黄岩当了 15 天钻工亲自上钻机打钻孔;1986 年后又亲自做了几百根桩的现场静荷载试验工作,并开发了既观测桩顶沉降又观测桩端沉降的测试技术,对桩的破坏方式了如指掌;之后亲自带领研究生与技术人员从事现场注浆系列技术开发并负责承担完成 20 多个工程灌注桩现场注浆生产实践任务,且进行注浆前后承载力对比试验及室内理论研究工作。本课题组已有 6 名研究生从事注浆

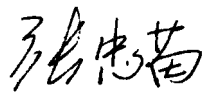
理论研究的基础积累,取得了一系列灌注桩后注浆研究的基础成果!现已亲自完成并收集积累 5000 多根灌注桩的现场静载试验资料和 600 多根注浆桩(亲自做了 300 多根并收集了 300 多根)的对比试验资料,这些资料对设计施工人员和研究人员很有研究价值,所以部分附在书后供大家参考(如要详细资料请联系 zjuzzm@163.com),也可避免研究生的“无土栽培”。因此,本书是笔者及其课题组 20 多年对桩基础及注浆技术研究方面辛勤实践耕耘和理论研究相结合的总结,是笔者呕心沥血 20 年磨一剑的心血结晶。

灌注桩后注浆技术不但可以提高桩基的承载力,而且可以减少群桩的沉降量,所以说它是 20 世纪基础工程应用中的最重大的发明与创造之一。现在国家大规模建设让大家有事可做,同时国家又要求大家保证工程质量,实行终身质量负责制,因此,工程建设者肩负的责任重大。所以,我们在实际工作中既要依据规范又不能僵硬地套用规范,坚守自己的良心和职业道德,坚持实事求是的科学作风,坚持实践是检验真理的唯一标准,并在工程实践中将成功经验总结上升为理论,以理论进一步指导实践。专利的优点是保护自身的知识产权,但缺点是不利于新技术推广。灌注桩后注浆是一项有利于工程质量及工程安全的新技术新工艺,值得大力推广。爱因斯坦说:复利(利滚利)的威力比原子弹还大,也就是说一个人掌握了一项技能,只要教会两个人,这两个人再各自教会两个人,只要几十层(2^n)就可以教会全世界所有的人。笔者编写本书的宗旨就是希望能为我国建设事业出绵薄之力!灌注桩后注浆技术及工程应用这本书内容包括绪论、钻孔灌注桩施工方法及受力性状、灌注桩岩土注浆理论、注浆水泥土及注浆模型桩的室内试验分析、注浆桩现场静载试验分析、桩端后注浆设计施工及实例、桩侧后注浆设计施工及实例及其他桩基注浆等。

本书从曾国熙先生一贯倡导的理论研究、现场试验与工程实践相结合的角度出发,系统阐述了灌注桩后注浆技术的基本原理与设计施工方法及应用效果。第 1 章介绍了钻孔灌注桩存在的问题及后注浆技术的定义、作用、分类及研究现状;第 2 章介绍了钻孔灌注桩的施工方法、受力机理与群桩沉降计算方法,统计分析了影响钻孔灌注桩承载性状的众多因素;第 3 章介绍了灌注桩岩土注浆理论及桩端后注浆提高承载力减少桩沉降量的机理;第 4 章介绍了室内注浆水泥土力学试验、细观机理及室内注浆模型桩试验等;第 5 章介绍了注浆桩现场静载试验分析,着重对比了不同持力层注浆桩与未注浆桩的承载力变化;第 6 章介绍了桩端后注浆桩的设计施工方法及实例;第 7 章介绍了桩侧后注浆桩设计施工方法及实例;第 8 章介绍了注浆锚杆桩、注浆树根桩、预制桩注浆、大直径钻埋空心注浆桩等注浆方法与施工实例。书末还附有《浙江大学灌注桩后注浆技术规程》。本书内容丰富,既可作为高等学校土木工程、水利工程、港口工程、道路工程、桥梁工程等专业学生的参考书,又可作为我国建设工程领域大量工程技术人员的应用参考书。

本书由张忠苗教授(国家重点学科浙江大学岩土工程研究所、浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室博士生导师)主要执笔,张广兴讲师协助执笔。经高文生本人同意,本书的第 4 章第 4.7 节和第 5 章第 5.3 节引用了中国建筑科学研究院高文生研究员博士论文(指导教师为刘金砺教授)所做的室内模型试验和现场模型试验的内容,本书第 7 章第 7.7 节引用了上海华东院王卫东总工做的地下抗拔桩注浆工程实例,本书第 3 章第 3.10 节引用了郝哲等人对岩层注浆流动规律的分析,在此深表感谢。辛公峰、邹健、

唐朝文、包风、张乾青、王华强、贺静漪、刘俊伟、喻君、徐俊及施茂飞、张功奖、陈建平、骆剑敏等为本书做了许多研究工作。衷心感谢浙江大学曾国熙教授和北京市建筑工程研究所沈保汉教授为本书作序。此外，北京航空航天大学朱建明副教授，浙江理工大学俞峰副教授，浙江省地震局周新民博士，浙江省建筑设计研究院副院长李志飏博士，浙江大学建筑设计研究院总工程师干刚博士，中国汉嘉设计集团股份有限公司常务副总工程师方鸿强教授级高工，温州市建筑设计院金国平院长、李朝晖副院长、张清华总工，浙江大学城市学院张世民副教授，浙江省工程物探勘察院魏玉轮教授级高工、李建华教授级高工，浙江绿城建筑设计院宋仁乾工程师和浙江大学曾国熙教授、吴世明教授、陈云敏教授、龚晓南教授、陈仁朋教授、丁皓江教授、王立忠教授、王铁如教授、夏唐代教授、徐日庆教授、张我华教授、唐晓武教授、谢康和教授、蔡袁强教授、凌道盛教授、韩同春副研究员、施雪飞、张宇、鲍远成、张先永、潘月赞、张锡焰、章国强、章丽斌、骆剑华、陈志祥、张云飞及学生汤展飞、王恒、朱红兵、叶兴永、任光勇、杨什生、陈洪、钦祥伟、卓建华、秦义新、吴庆勇、方万军、唐翔、杨忠良、竺松、林存刚、房凯、谢志专、赵玉勃、王智杰、何景愈等都提出了宝贵意见。感谢中国建筑工业出版社王梅编辑等为本书的出版付出的辛勤工作。由于桩基工程学学科不断发展，新问题层出不穷，新方法不断出现，而人类重在继承与发扬，让灌注桩后注浆这项新技术能够得到推广应用，因此，本书在编写过程中主要参考并依据国家《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）、《建筑桩基技术规范》（JGJ 94—2008）等规范。虽然本书主要为笔者课题组的多年研究成果，但同时也参考了桩基工程专业书籍和专业论文中相关注浆方面的文献资料（限于篇幅未一一列出），谨此向在本书中引用内容的作者表示深深的谢意。笔者感谢在过去 25 年桩基研究中所有合作同行的大力支持。本书得到了国家自然科学基金（基金编号：50478080）资助，在此表示感谢。由于编者水平和能力的限制，书中难免存在许多不当之处。编者将以感激的心情诚恳接受旨在改进本书的所有读者的任何批评和建议。



2008 年 12 月于浙江大学求是园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 钻孔灌注桩施工存在的问题	1
1.2 灌注桩桩端（侧）后注浆的定义及作用	5
1.3 灌注桩后注浆技术的分类	7
1.4 桩端（侧）后注浆的工程应用	13
1.5 桩端（侧）后注浆的研究现状	18
1.6 桩端（侧）后注浆技术的展望	23
1.7 本章总结	24
1.8 本书的主要内容	24
第 2 章 钻孔灌注桩施工方法及受力性状	26
2.1 概述	26
2.2 钻孔灌注桩施工方法	26
2.3 钻孔灌注桩受力机理	56
2.4 本课题组 5000 多根钻孔灌注桩静载资料统计与规律分析	64
2.5 钻孔灌注桩群桩基础沉降计算	84
2.6 本章总结	93
第 3 章 灌注桩的岩土注浆理论	96
3.1 概述	96
3.2 岩土介质的渗透性	96
3.3 岩土介质可注性理论	97
3.4 渗透注浆理论	98
3.5 压密注浆理论	100
3.6 劈裂注浆理论	102
3.7 渗透、压密与劈裂注浆的注浆曲线特性	105
3.8 桩端后注浆柱（球）扩张理论及浆液上返高度分析	107
3.9 桩端后注浆注浆量理论与实测研究	126
3.10 岩体裂隙中注浆浆液的流动理论	129
3.11 桩端注浆提高桩承载力减少变形的机理	134
3.12 不同桩端持力层后注浆钻孔灌注桩的破坏模式	138
3.13 分层位移迭代法对注浆前后 $Q-s$ 曲线分析	140
3.14 桩端后注浆桩极限承载力的计算	142
3.15 本章总结	151

第4章	注浆水泥土及注浆模型桩的室内试验分析	153
4.1	概述	153
4.2	原状土与注浆水泥土的细观机理试验研究	153
4.3	室内注浆土强度试验分析	159
4.4	室内注浆剪切试验分析	168
4.5	钻孔桩桩间土与桩侧泥皮土室内试验分析	173
4.6	压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析	179
4.7	灌注桩后注浆室内模型试验分析	184
4.8	灌注桩室内离心模型试验分析	197
4.9	灌注桩后注浆有限元模拟分析	208
4.10	本章总结	212
第5章	注浆桩现场静载试验分析	215
5.1	概述	215
5.2	灌注桩后注浆现场静载试验分析	215
5.3	灌注桩后压浆现场模型试验分析	229
5.4	注浆与非注浆钻孔灌注桩对比统计分析	234
5.5	本章总结	247
第6章	桩端后注浆设计施工及实例	249
6.1	概述	249
6.2	桩端后注浆设计	249
6.3	桩端后注浆设计实例	256
6.4	桩端后注浆施工工艺	260
6.5	桩端后注浆注意事项及注浆事故处理	270
6.6	注浆效果检测	274
6.7	桩端后注浆桩的工程实例分析	274
6.8	本章总结	329
第7章	桩侧后注浆设计施工及实例	332
7.1	概述	332
7.2	桩侧压力注浆机理	332
7.3	桩侧泥皮及桩侧注浆试验研究	334
7.4	桩侧压力注浆设计及施工工艺	336
7.5	桩端桩侧联合注浆	339
7.6	抗拔桩桩侧后注浆	341
7.7	桩侧后注浆的工程实例分析	343
7.8	本章总结	349
第8章	其他桩基注浆	351
8.1	概述	351
8.2	锚杆注浆桩	351

8.3	注浆树根桩	357
8.4	预制混凝土桩桩底注浆	360
8.5	预应力管桩桩底注浆	362
8.6	灌注桩桩身缺陷注浆加固	364
8.7	大直径钻埋空心注浆桩	365
8.8	土层注浆搅拌桩	369
8.9	本章总结	371
附录一	浙江大学灌注桩后注浆技术规程	373
附录二	614 根注浆对比桩静荷载试验资料汇总表	384
参考文献		418

CONTENTS

Chapter 1	Exordium	1
1.1	Existing Problems in Bored Pile Construction	1
1.2	Definition and Function of Pile-end (side) Post-Grouting	5
1.3	Classification of Post-Grouting Technology	7
1.4	Application of Pile-end (side) Post-Grouting	13
1.5	Research Status of Pile-end (side) Post-Grouting	18
1.6	Prospect of Pile-end (side) Post-Grouting Technology	23
1.7	Summary	24
1.8	Main Content of This Book	24
Chapter 2	Construction Methods and Behavior of Bored Pile	26
2.1	Overview	26
2.2	Construction Methods of Bored Pile	26
2.3	Behavior of Bored Pile	56
2.4	Statistical Analysis on Static Load Tests of more than 5000 Bored Piles	64
2.5	Settlement Calculation of Bored Pile Group	84
2.6	Summary	93
Chapter 3	Theory of Bored Pile Grouting in Rock and Soil	96
3.1	Overview	96
3.2	Permeability of Rock and Soil Media	96
3.3	Theory of Grouting in Rock and Soil Media	97
3.4	Theory of Permeation Grouting	98
3.5	Theory of Compaction Grouting	100
3.6	Theory of Fracturing Grouting	102
3.7	Characteristics of Permeation, Compaction and Fracturing Grouting Curves	105
3.8	Cavity Expansion Theory and Study on the Climb-height of Bored Pile with Pile-end Post-Grouting	107
3.9	Theory and Field Research of Grouting Amount	126
3.10	Flow Theory of Cement Grouting in Rock Fracture	129
3.11	Mechanism of Pile-end Post-Grouting in Improving Bearing Capacity and Reducing Settlement of Bored Pile	134

3.12	Failure Modes of Post-Grouting Bored Piles with Various End-Bearing Strata	138
3.13	Analysis on Q - s Curves of Non-grouted Bored Pile and Grouted Bored Pile with Displacement Iterative Method	140
3.14	Bearing Capacity Calculation of Bored Pile With Pile-end Post-Grouting	142
3.15	Summary	151
Chapter 4	Laboratory Investigation on Grouted Soil and Grouted Model Pile	153
4.1	Overview	153
4.2	Microscopic Mechanism of Raw Soil and Cemented Soil	153
4.3	Laboratory Analysis on the Strength of Grouted Soil	159
4.4	Laboratory Analysis on the Shear Tests of Grouted Soil	168
4.5	Laboratory Analysis on the Soil Between Bored Piles and Mud Cake Around Bored Piles	173
4.6	Laboratory Simulation on Compaction Grouting and Fracture Grouting	179
4.7	Laboratory Model Tests on Post-Grouting of Bored Pile	184
4.8	Centrifugal Model Tests on Bored Pile	197
4.9	FEM Simulation on Post-Grouting of Bored Pile	208
4.10	Summary	212
Chapter 5	Static Load Test Study on Grouted Pile	215
5.1	Overview	215
5.2	Field Static Load Test Study on Bored Pile With Pile-end Post-Grouting	215
5.3	Field Model Test Study on Post-Grouting of Bored Pile	229
5.4	Statistical Comparison of Grouted Bored Pile and Non-grouted Bored Pile	234
5.5	Summary	247
Chapter 6	Design and Construction of Pile-end Post-Grouting and Case Histories	249
6.1	Overview	249
6.2	Design of Pile-end Post-Grouting	249
6.3	Design Examples of Pile-end Post-Grouting	256
6.4	Construction of Pile-end Post-Grouting	260
6.5	Attentive Proceeding and Accident Treatment of Post Grouting	270
6.6	Examining the Effect of Post Grouting	274
6.7	Case Histories Analysis of Pile-end Grouting Pile	274
6.8	Summary	329

Chapter 7	Design and Construction of Pile-side Post-Grouting and	
	Case Histories	332
7.1	Overview	332
7.2	Mechanism of Bored Pile With Pile-side Post-Grouting	332
7.3	Test Study on Mud Cake and Pile-side Grouting	334
7.4	Design and Construction Technology of Pile-side Pressured Grouting	336
7.5	Combined Grouting of Pile end and Side	339
7.6	Pile-side Post-Grouting of Uplift Pile	341
7.7	Case Studies on Pile-side Grouting	343
7.8	Summary	349
Chapter 8	Application of Grouting in Other Pile Types	351
8.1	Overview	351
8.2	Grouted Anchor-pile	351
8.3	Grouted Root-pile	357
8.4	Pile-end Grouting of Precast Concrete Square Pile	360
8.5	Pile-end Grouting of Precast Concrete Tubular Pile	362
8.6	Grouting for Reinforcing the Defects of Bored Piles	364
8.7	Grouting of Large Diameter Drilled and Buried Hollow Pile	365
8.8	Grouting of Soil-Mixing Pile	369
8.9	Summary	371
Appendix 1	Technical Specification for Post-Grouting of Bored Piles at	
	Zhejiang University	373
Appendix 2	Statistical Table of 614 Static Loading Tests on Grouted Piles	384
References		418

第1章 绪 论

要了解灌注桩后注浆技术的必要性和重要性，首先要分析钻孔灌注桩施工存在的问题及危害。

1.1 钻孔灌注桩施工存在的问题

钻孔灌注桩是一种最为常见的基础形式，我国应用灌注桩始于 20 世纪 60 年代，早期应用于桥梁和港口建筑的基础中；自 60、70 年代后又陆续应用在各大城市的高层建筑物的基础中；自 80 年代改革开放后，灌注桩这种基础形式已在全国各地得到了大量的应用，它适合于各种土层和岩层，包括软土、黄土、膨胀土等不良土质及各类岩石。钻孔灌注桩施工先用机械钻成孔（到设计桩长或设计持力层深度），采用泥浆护壁，然后下钢筋笼和导管并清理沉渣，最后灌注混凝土成桩。灌注桩的优点在于桩长和桩径可以灵活选取，施工不受季节限制，无挤土，能广泛适用于各类土质条件并能提供巨大的单桩承载力等。所以，灌注桩在各种基础中应用越来越广泛。目前，最大施工桩长已达 150m，最大施工桩径已达 3m。但在实际施工及应用中钻孔灌注桩也出现了一些问题。主要表现在以下几个方面。

1. 桩侧泥皮及应力松弛问题

钻孔灌注桩施工时由于不同深度处土性的差别、地下水压力的变化以及钻机扰动等因素会造成孔径变化，如图 1-1 所示。成孔时为了平衡地层压力，稳定孔壁，防止塌孔、缩孔，一般采用泥浆护壁措施，泥浆材料对砂性土一般添加膨润土及外加剂等，对黏性土一般就地造浆或添加少量膨润土。泥浆护壁成孔往往在桩周形成一薄弱层，即泥皮，厚度从几毫米到几厘米不等，如图 1-2 所示。桩侧泥皮的存在，改变了桩土相互作用性状，相对原桩侧土来讲，泥皮具有含水量高、压缩性大、抗剪强度低的特点。当泥皮很厚时，土层本身的物理力学性质将难以体现，使得钻孔桩侧摩阻力大幅降低。泥皮

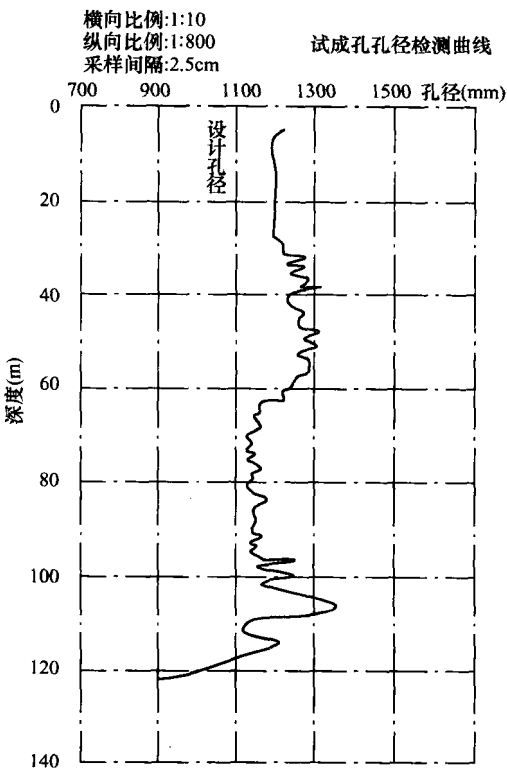


图 1-1 钻孔桩实测孔径曲线

较厚的长桩还将产生侧摩阻力的软化等现象,从而严重影响了钻孔灌注桩的承载性能。

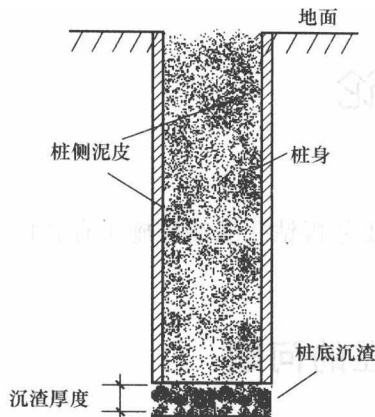


图 1-2 泥浆护壁钻孔桩泥皮沉渣

另外,钻孔灌注桩在成孔过程中由于孔壁侧向应力解除,桩侧土体会出现侧向应力松弛。孔壁土的松弛效应也将导致土体强度削弱,桩侧阻力随之降低。桩侧阻力的降低幅度与土性、护壁措施、孔径大小等诸多因素有关。对于干作业钻、挖孔桩无护壁条件下,孔壁土处于自由状态,土产生向心径向位移,浇注混凝土后,径向位移虽有所恢复,但侧阻力仍有所降低。对于无黏聚性的砂土、碎石类土中的大直径钻、挖孔桩,其成桩松弛效应对侧阻力的削弱影响是不容忽略的。凡是湿法施工的钻孔灌注桩一般必须采用泥浆护壁,所以泥皮效应也是不可避免的。

钻孔灌注桩的泥皮问题可导致桩的承载力降低,桩沉降过大。从典型的静载试验 $Q-s$ 曲线就可以反映出来。图 1-3 (a) 为钻孔桩桩侧泥皮导致的侧阻软化现象,该桩桩侧桩端均为淤泥质土层,表现为纯摩擦桩刺入破坏特征,且加到最大试验荷载后桩侧土摩阻力软化。 $Q-s$ 曲线表现为 3 个阶段:当荷载水平较低时, $Q-s$ 曲线为直线弹性段;当荷载增大时, $Q-s$ 曲线为弹塑性段;当桩顶荷载达到或超过桩侧极限摩阻力时,桩顶荷载达到最大峰值后沉降急剧加大,同时压力下跌,静阻力转变为动阻力,桩侧摩阻力软化,桩顶荷载最后维持在残余强度值。

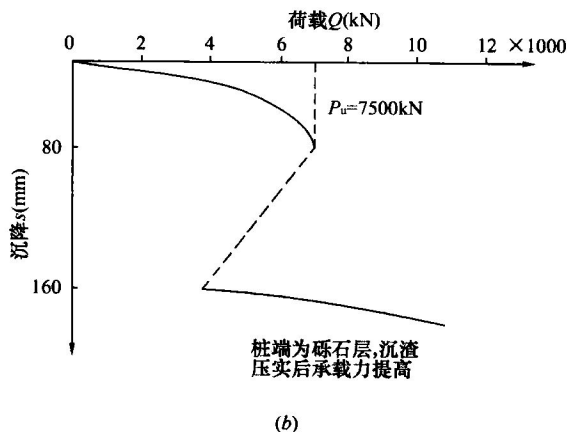
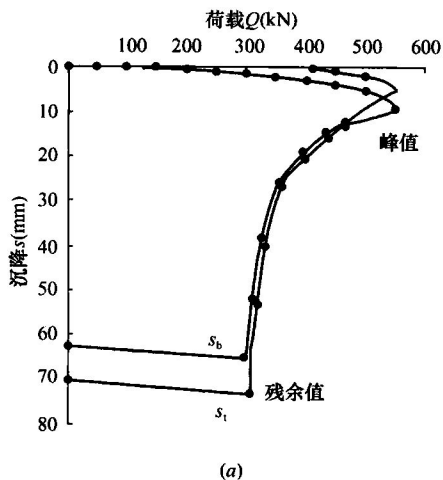


图 1-3 桩身完整桩端刺入软化破坏曲线

(a) 泥皮导致的侧阻软化现象; (b) 沉渣过厚压实后承载力提高

2. 桩端沉渣及持力层扰动问题

泥浆护壁钻孔灌注桩存在的另一个问题就是桩端沉渣问题。在施工过程中,不可避免一部分土体碎屑沉淀在孔底形成沉渣,如图 1-2 所示。如果孔底沉渣难于清理或清理不干净,则会对钻孔灌注桩承载力产生影响。桩端沉渣层的存在,使桩端相当于支承在软

弱层上，降低了钻孔灌注桩的桩端承载力，并且使桩顶沉降量大大增加，从而使灌注桩的承载能力得不到正常发挥。

对于钻孔灌注桩，由于成桩过程中钻孔机具会对桩端土体产生搅动、切削、挤压等作用，对持力层产生扰动，因而也会使端阻力降低；在持力层为砾石层中钻孔灌注桩正循环清孔一般只是将细颗粒清上来，而粗大颗粒仍留在桩端造成空隙增大，泥浆沉淀到空隙中造成端阻力降低。凡是湿法施工的钻孔灌注桩一般均要采用泥浆护壁，就必然会带来桩端沉渣问题。

钻孔灌注桩的沉渣问题可导致桩的承载力降低，桩沉降过大。图 1-3（b）为典型的桩端沉渣过厚的破坏曲线，由于沉渣过厚，使得桩侧阻力发挥完全而桩端未承担荷载，导致桩自动下沉 120mm，并且压力下跌。在沉渣被压实后，随着端阻力的部分恢复，承载力又逐渐增加。

3. 桩身灌注混凝土质量问题

在钻孔灌注桩施工中难免存在缩扩颈现象，在混凝土灌注过程中会存在桩身离析、夹泥、桩顶浮浆等现象。但桩身混凝土质量问题是施工可控因素。如打桩地层容易发生缩扩颈则在施工时加强泥浆护壁可以避免；如桩身离析夹泥等现象则在灌注混凝土时把握好商品混凝土的坍落度、混凝土的合理埋管高度等正常浇灌措施可避免；如桩顶浮浆现象则控制合理的混凝土超灌高度可避免。总之，桩身混凝土质量问题只要施工和监理单位规范管理、认真负责，是可降低到最低限度并满足规范要求的。但灌注桩在浇灌混凝土成桩时由于混凝土的收缩会产生与桩侧土间的收缩缝问题。

4. 同一场地钻孔灌注桩竖向承载力离散性问题

相同桩型、桩径和持力层的钻孔灌注桩，由于施工技术水平的差异、沉渣厚度不同、地质条件的局部差异以及其他因素的影响，会导致同一工地钻孔灌注桩竖向承载力离散性问题。承载力离散问题导致了群桩基础的不均匀沉降。

如温州某工程，该工程由 5 幢 18 层的高层建筑和 3 层的裙房及地下室组成。工程基础采用钻孔灌注桩，共进行了 26 根试桩，其中静压试桩 1-1 号、1-2 号、2-1 号、2-2 号、3-1 号、3-2 号、4-1 号、4-2 号、5-1 号的桩径为 800mm，桩长为 25.5~35.0m，桩身混凝土强度为 C25，桩基持力层为中风化基岩层，设计单桩竖向承载力特征值为 3050kN。该工程采用正循环法钻孔施工，但沉渣清理有问题。

场地岩土层分层及主要物理力学指标见表 1-1。

温州某工程地基岩土主要物理力学性质指标参数表 表 1-1

层 次	岩土名称	层厚（m）	层底埋深（m）	f_{ak} （kPa）	E_s （MPa）	q_{sia} （kPa）	q_{pa} （kPa）
1	杂填土	0.5~4.3	0.5~4.3				
2	黏土	0.2~1.3	1.35~3.6	90	3.5	9	
3-1	淤泥	0.3~6.3	2.8~8.7	43	1.1	5	
3-2	含碎石淤泥	0.3~1.3	5.0~8.6	50	1.8	7	
4	含碎石粉质黏土	0.4~5.4	1.7~14.1	140	5.0	18	200
5-1	全风化基岩	1.7~19.7	5.7~27.2	150	6.5	22	400
5-2	全风化基岩	2.5~28.5	12.1~47.6	200	8.0	30	600
5-3	强风化基岩	1.3~51.3	29.6~72.8	400		50	1800
5-4	中风化基岩	3.3~19.0	43.5~80.0	2500		100	4000