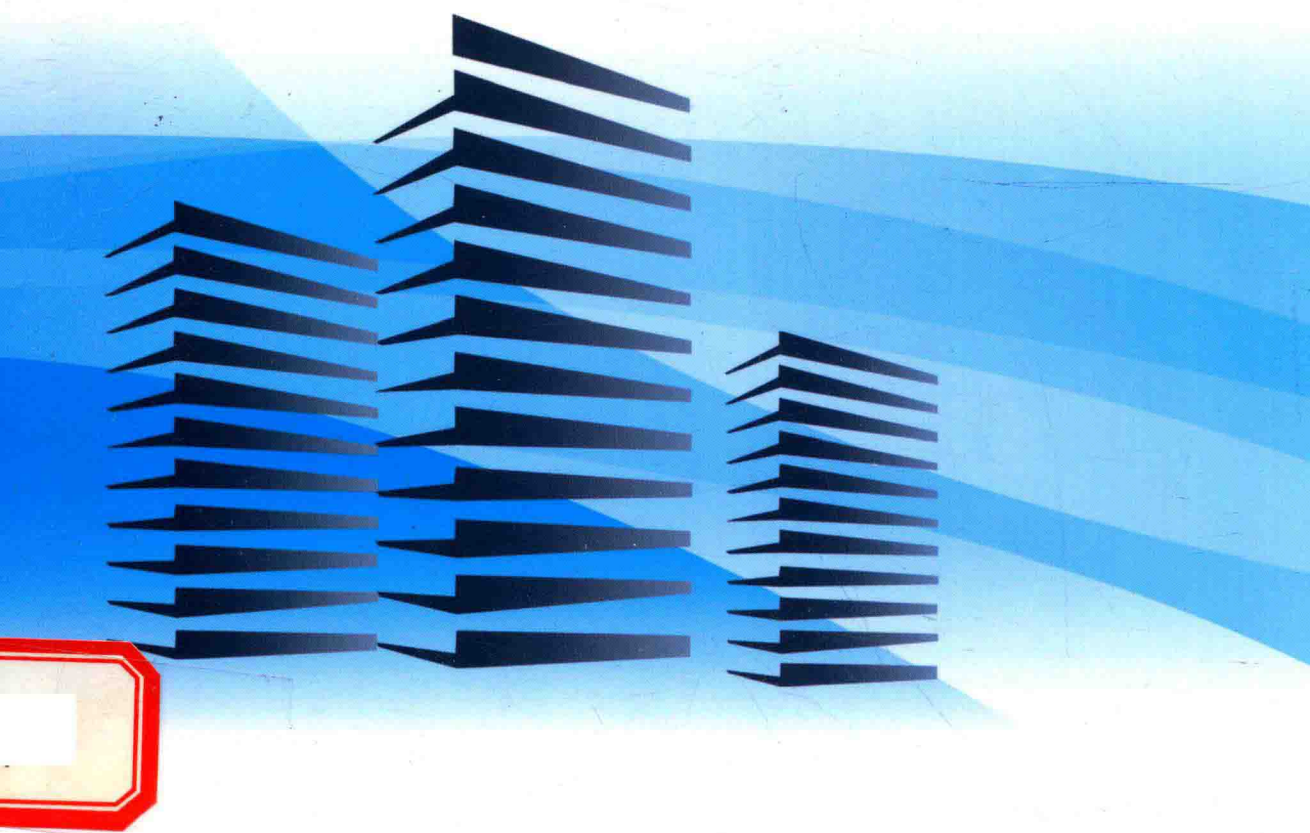


GUANZHUZHUANG HOUZHUJIANG JISHU YUANLI
YU GONGCHENG SHIJIAN

灌注桩后注浆技术原理 与工程实践

○ 黄生根 彭从文 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

灌注桩后注浆技术原理与工程实践

GUANZHUZHUANG HOUZHUJIANG JISHU YUANLI YU GONGCHENG SHIJIAN

黄生根 彭从文 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

灌注桩后注浆技术原理与工程实践/黄生根,彭从文著. —武汉:中国地质大学出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-5625-3470-9

I. ①灌…

II. ①黄… ②彭…

III. ①灌注桩-灌浆-研究

IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 125014 号

灌注桩后注浆技术原理与工程实践

黄生根 彭从文 著

责任编辑:王凤林 王 敏

责任校对:代 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:230 千字 印张:9

版次:2016 年 6 月第 1 版

印次:2016 年 6 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3470-9

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

灌注桩的承载性能与桩的几何尺寸、桩身强度、桩土间的相互作用效应等因素有关。桩土间的相互作用效应主要表现为桩侧摩阻力和桩端阻力的大小及其作用特性。根据大量的工程实践和研究成果,桩侧摩阻力和桩端阻力的大小及其作用特性除与土层条件等因素有关外,还受施工工艺的影响。

工艺因素的影响主要表现为:①灌注桩施工工序较多,施工工期较长,在施工过程中,可能遇到复杂的地质条件和孔内事故;②施工单位的机械设备、施工工艺、技术水平和管理水平差别很大,桩基施工的质量差异性大;③灌注桩施工采用泥浆护壁,必然在孔壁形成泥皮,在孔底残留沉渣和扰动桩端土体,从而大大降低桩侧摩阻力和桩端阻力,使桩的承载力大幅降低,不能发挥其强度潜能。而且,这些影响因素具有很大的随机性,使钻孔灌注桩的承载性能往往表现出很大的离散性,不仅造成资源的严重浪费,还大大降低了钻孔灌注桩工程质量的可靠性。同时,由于桩越长,桩径越大,所面临的问题也就越多。施工中从钻孔、清孔到下钢筋笼、灌注的各个环节面临的风险更大,施工工艺本身存在的缺陷表现越明显,影响施工质量的因素会更多,可靠性也更差。

为保证桩的承载力达到要求,缩短桩长或提高桩的承载力,采用后注浆技术是一种廉价和可靠的方法。另外,后注浆可减少桩基施工的人为影响及施工质量的差异性,使桩基性能的可靠度得到提高,对确保工程质量具有重要意义。

后注浆技术以往主要应用于城市建设中的高层建筑,其桩径、桩长一般较小。近年来,随着工程实践的发展,超长大直径桥梁桩开始应用该项技术,如杭州湾跨海大桥、苏通大桥、甬江铁路特大桥等。后注浆技术以往主要应用于持力层以砂土为主的建筑,随着工程实践的发展,在黏性土和嵌岩桩中应用后注浆技术也取得了良好的效果。

在对灌注桩进行注浆时,浆液在土层中往往以充填、渗透、挤密和劈裂等多种形式与土体相互作用,改变土体原有的结构,进而改变土体初始应力场和位移场。但到目前为止,注浆对土体强化加固的内在机制尚不明确,一些问题还无法解释,理论研究还远远滞后于工程实践。

本书总结了作者多年来在后注浆作用机理、工程应用和数值计算等方面的研究成果,希望有助于后注浆技术的完善和发展。

在本书的写作过程中,得到了诸多专家的支持和帮助,也得到了多位硕士生的帮助,在此一并致谢。

限于作者水平,难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

1 概 述	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 后注浆分类	(2)
1.3 国内外研究现状	(4)
2 后注浆的作用机理研究	(10)
2.1 土层注浆机理分析	(10)
2.2 注浆对桩侧土的影响机理	(14)
2.3 注浆对桩侧土层作用机理的理论分析	(17)
2.4 注浆对桩端土层的作用机理	(21)
2.5 注浆对桩端土层作用机理的理论分析	(23)
3 灌注桩后注浆技术的现场试验	(27)
3.1 苏通大桥试桩的现场试验研究	(27)
3.2 郑州黄河二桥试桩的现场试验研究	(47)
3.3 河南发展大厦试桩的现场试验研究	(53)
4 灌注桩后注浆技术机理与承载性状的数值分析	(61)
4.1 概述	(61)
4.2 数值模拟方法	(61)
4.3 浆液运移性状数值模拟	(72)
4.4 桩端后注浆桩承载性能数值模拟	(88)
4.5 苏通二期试桩有关参数的反分析	(103)
4.6 桩端注浆对超长灌注桩承载性能的影响分析	(105)
5 后注浆施工技术	(109)
5.1 传统后注浆方法	(109)
5.2 桩端循环注浆(U型管注浆)工艺原理	(111)
6 后注浆技术的工程实践	(115)
6.1 后注浆技术在超长大直径桩中的应用	(115)
6.2 后注浆技术在黏性土中的应用	(122)
6.3 后注浆技术在软土中的应用	(123)
6.4 后注浆技术在嵌岩桩中的应用	(126)

7 后注浆桩的可靠度分析 (131)

7.1 随机变量的概率统计特性 (131)

7.2 可靠度指标的计算与分析 (134)

参考文献 (137)

1 概 述

1.1 引言

桩的承载性能与桩侧摩阻力、桩端阻力大小及作用特性有关。而桩侧摩阻力、桩端阻力的大小及作用特性除与土层条件、桩的几何尺寸等有关外,还受施工工艺的影响。施工工艺的影响主要有以下几方面:①灌注桩在成孔过程中,使地层中形成了较大的自由面,改变了地层的初始应力状态,桩周土体向孔中心产生不同程度的位移,引起地层侧压力的降低,使桩土间的法向应力减小,桩侧摩阻力降低。②灌注桩在成孔时,为维持孔壁稳定,避免出现坍塌和缩径现象,一般采用泥浆护壁。泥浆中的黏土颗粒在循环过程中吸附于孔壁,形成泥皮,从而起到保护孔壁的作用。但泥皮的存在,阻碍了桩身混凝土与桩间土的黏结,会不同程度地降低桩侧摩阻力。摩阻力降低的程度与泥皮的质量、厚度等有关,泥皮质量越好,厚度越大,摩阻力就越低。另外,在孔内泥浆的浸泡下,桩周一定范围内土层的抗剪强度会降低,从而导致桩侧摩阻力的降低。③灌注桩在成孔过程中产生的孔底沉渣不仅降低桩端阻力,还对一定范围内的桩侧阻力产生弱化作用。以上影响因素具有很大的随机性,使灌注桩的承载性能往往表现出很大的离散性,有关试验结果表明,对同一个施工场地、相同结构的桩,其承载力最大可相差2倍以上,不仅造成资源的严重浪费,还大大降低了灌注桩工程质量的可靠性。

为保证桩的承载力达到要求,或提高桩的承载力,除了选用合理的钻具,采用合理的工艺参数和加强质量管理外,还可通过采用后注浆技术来改善桩的承载特性,从而达到上述目的。在对灌注桩进行后注浆时,浆液在土层中往往以充填、渗透、挤密和劈裂等多种形式与土体相互作用,改变土体原有的结构,进而改善桩土作用性状。根据有关试验资料,后注浆对极限荷载的提高幅度一般在30%~150%之间,技术经济效益十分显著。而且,后注浆可减少桩基施工的人为影响及施工质量的差异性,使桩基性能的可靠度得到提高,对确保工程质量具有重要意义。

近年来,随着国家基础设施建设投资规模的日益增大,后注浆技术的应用从市政建设扩展至公路桥梁等多个领域,所涉及桩的直径和长度均大幅增加,并在杭州湾跨海大桥、苏通大桥和甬江铁路特大桥等超长大直径桩上取得了很好的应用效果。

从总体上来看,目前国内外对后注浆理论的研究远落后于实践,后注浆作用机理的研究主要停留在有限的试验数据的统计分析上,还缺乏全面深入的认识和必要的理论。本书结合一些典型工程的应用情况和笔者近年来得到的研究成果,对后注浆技术的理论与工程应用进行介绍。

1.2 后注浆分类

后注浆技术的基本原理是通过预先设置于钢筋笼上的注浆管,在桩体达到一定强度后(一般 3~7 天),向桩侧或桩底注浆,固结孔底沉渣和桩侧泥皮,并使桩端和桩侧一定范围内的土体得到加固,从而达到提高承载力的目的,其工艺流程见图 1-1。

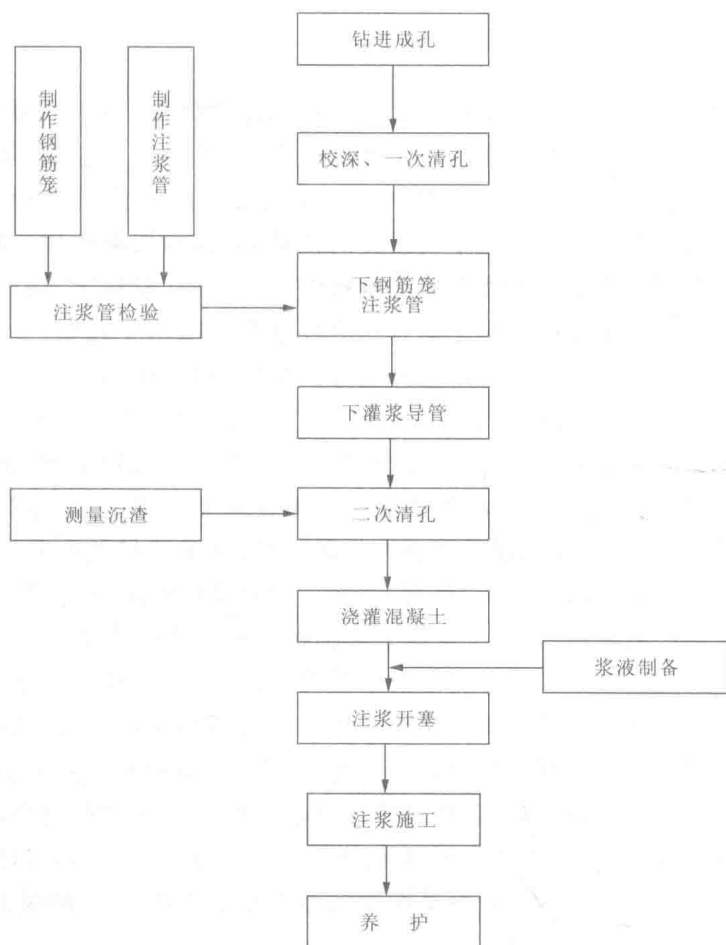


图 1-1 后注浆桩施工工艺流程图

后注浆的类型很多,可分别按注浆工艺、注浆部位、注浆管埋设方式及浆液循环方式进行分类。

1.2.1 按注浆工艺分类

按注浆工艺可分为闭式注浆和开式注浆。

(1) 闭式注浆:将预制的弹性良好的腔体(又称承压包、预承包、注浆胶囊等)或压力注浆室随钢筋笼放至孔底。成桩后通过地面压力系统把浆液注入腔体内。随着注浆量的增加,弹性

腔体逐渐膨胀、扩张,对沉渣和桩端土层进行压密,并用浆体取代(置换)部分桩端土层,从而在桩端形成扩大头。

(2)开式注浆:连接于注浆管端部的注浆装置随钢筋笼一起放置于孔内某一部位,成桩后注浆装置通过地面压力系统把浆液直接压入桩底和桩侧的岩土体中,浆液与桩底和桩侧沉渣、泥皮及周围土体等产生渗透、填充、置换、劈裂等多种效应,在桩底和桩侧形成一定的加固区。

1.2.2 按注浆部位分类

按注浆部位可分为桩侧注浆、桩端注浆和桩侧桩端注浆。

(1)桩侧注浆:仅在桩身某一部位或若干部位进行注浆。桩侧注浆的做法一般有两种:一种为直管法,在桩侧某一个或多个部位设置2~4个注浆装置,形成多点源的桩侧壁注浆,见图1-2;另一种为环管法,在桩侧某一个或多个部位设置注浆环管,环管外侧均匀分布若干个泄浆孔,形成环状的桩侧壁注浆,见图1-3。



图 1-2 直管法侧注浆装置

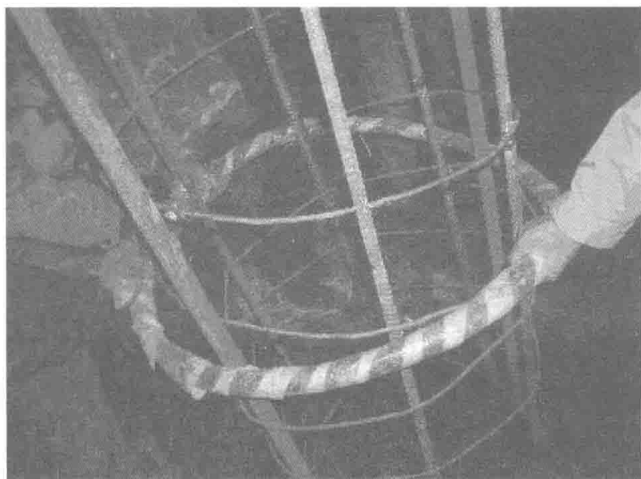


图 1-3 环管法侧注浆装置

环管法从理论上讲要比直管法效果好,浆液扩散更均匀,但根据工程实践,只要布置合理,两者的注浆效果差异不大。因为桩土间存在一个软弱区,即桩土界面,在压力作用下,软弱区可形成一个贯通的环状压力源,而且根据多次地面试验,环管法的泄浆口往往只有部分能打开,其作用也相当于多点源。

(2)桩端注浆:仅在桩端进行注浆。桩端注浆的影响包括对桩端土的影响和对桩侧土的影响。

(3)桩侧桩端注浆:在桩身若干部位和桩端进行注浆。

1.2.3 按注浆管埋设方式分类

按注浆管埋设方式可分为桩身预埋管注浆法和钻孔埋管注浆法。

(1)桩身预埋管注浆法:注浆管固定在钢筋笼上,注浆装置随钢筋笼一起下放至桩孔某一深度或孔底。

(2)钻孔埋管注浆法:钻孔方式有两种:一种在桩身中心钻孔,并深入到桩底持力层一定深度(一般为1倍桩径以上),然后放入注浆管,封孔并间歇一定时间后,进行桩底注浆;另一种是在桩外侧的土层中钻孔,即成桩后,距桩侧0.2~0.3m钻孔至要求的深度,然后放入注浆管,封孔并间歇一定时间后,进行注浆。

1.2.4 按注浆循环方式分类

按注浆循环方式可分为单向注浆和循环注浆。

(1)单向注浆:每一注浆系统由一个进浆口和桩端或桩侧注浆器组成。注浆时,浆液由进浆口到注浆器的单向阀,再到土层,呈单向性。注浆管路不能重复使用,不能控制注浆次数和注浆间隔。

(2)循环注浆:也称为U型管注浆,每一个注浆系统由一根进口管、一根出口管和一个压力注浆装置组成。注浆时,将出浆口封闭,浆液通过桩端注浆器的单向阀注入土层中。一个循环压完规定的浆量后,将注浆口打开,通过进浆口以清水对管路进行冲洗,同时桩端注浆器的单向阀可防止土层中浆液的回流,保证管路的畅通,便于下一循环继续使用,从而实现注浆的可控性。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 后注浆技术的研究进展

根据有关文献,后注浆技术于1961年在委内瑞拉 Marracaibo 大桥中首次应用,该工程通过注浆盒对桩端进行注浆。1973年 Bolognesi 和 Moretto 采用相同的装置(图1-4)对 Parana 运河上几百根长75m、直径2m的桥梁桩进行桩端注浆,采用净水泥浆液,浆液水灰比为0.6,注浆间隔12h,每一间隔的最终注浆量根据桩径不同为500~1000kg,直到最终的压力达到10MPa且维持5min或桩顶上抬量达到20mm为止。

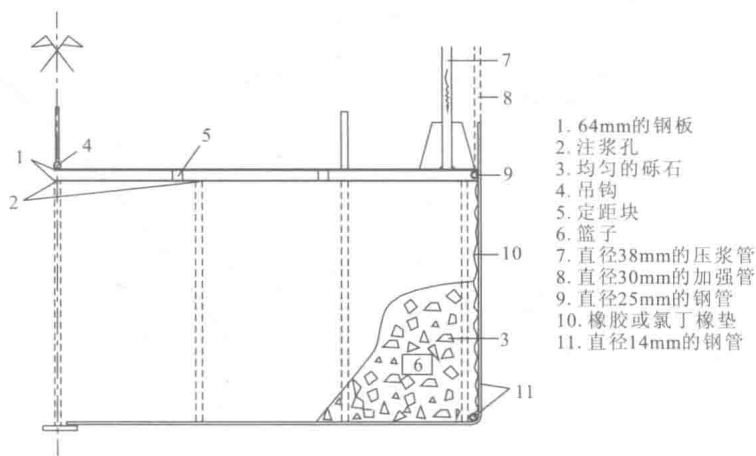


图 1-4 Parana 桩端注浆装置图

1975 年, Gouvenot 和 Gabaix 对 6 根直径 660mm、施工于砂土和黏土中的桩进行了试验, 土层分布见图 1-5。注浆施工分 3 个阶段进行: 初始阶段(浆液自重压力作用阶段)和进行压力注浆的第二阶段及第三阶段。试桩试验与注浆施工相对应, 分 3 次进行, 试验结果见图 1-6 和图 1-7。

Gouvenot 和 Gabaix 在总结后注浆试验的效果后得出以下结论: ①极限承载力 Q_L 的提高幅度达到 2~3 倍; ②屈服荷载 Q_F 的变化与极限承载力相同, 且比值 Q_L/Q_F (1.3~1.6 之间) 与注浆影响无关; ③在循环荷载作用下几乎没有残余变形; ④极限承载力的提高幅度与 $\sqrt{\frac{V+V_P}{V_0+V_P}}$ 存在比例关系, 见图 1-8, 式中 V 为浆液体积, V_0 为桩的体积, V_P 为初始重力注浆消耗的浆液体积。

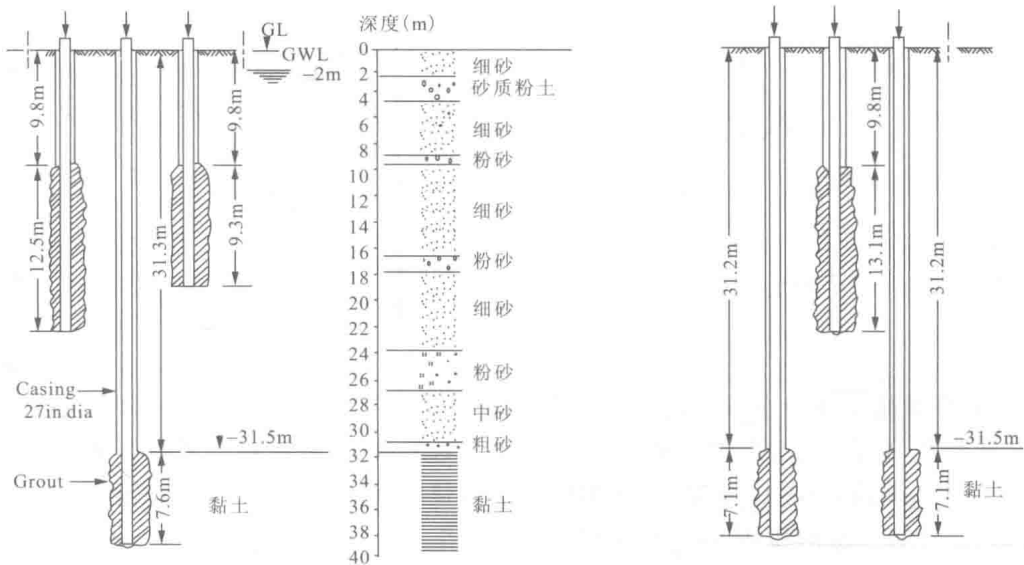
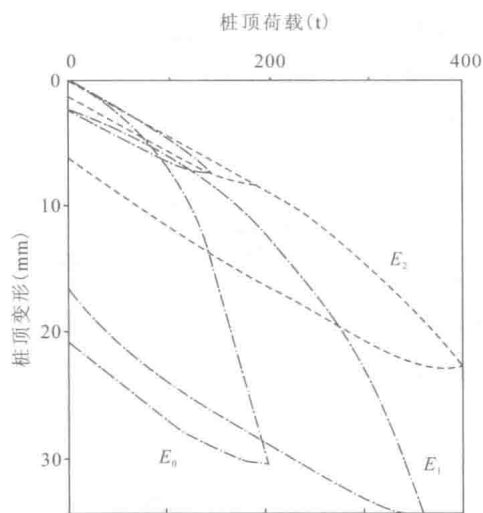
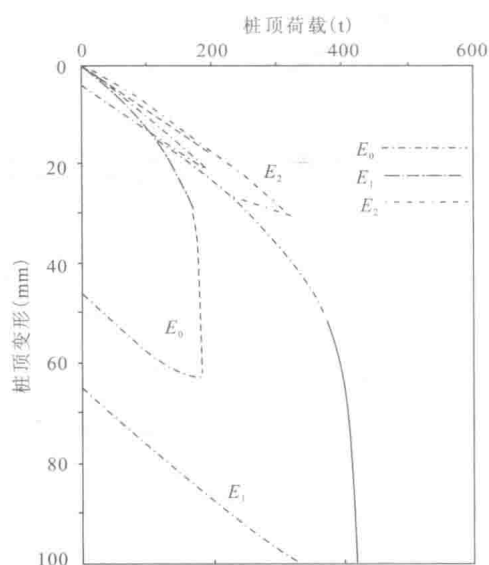
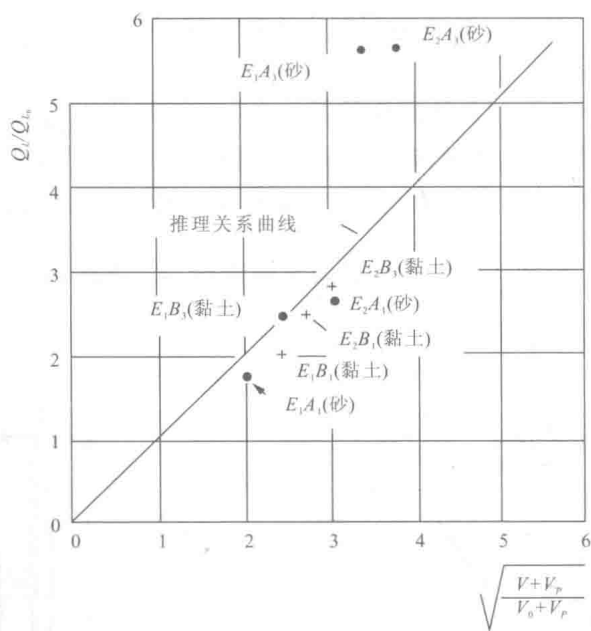


图 1-5 土层分布及桩的布置

图 1-6 注浆后的 $P-S$ 曲线(砂土中)图 1-7 注浆后的 $P-S$ 曲线(黏土中)图 1-8 极限承载力与 $\sqrt{\frac{V+V_p}{V_0+V_p}}$ 关系曲线

英国曾在桥梁工程中应用桩底注浆技术,其灌注桩直径 2.0m,最大桩长 75m,在注浆施工中采用“注浆盒”装置,固定在钢筋笼的下端,一起下入桩孔中,在混凝土浇灌 2 天后,利用 2~4 根注浆管注入浆液,注浆压力为 2~10MPa。法国曾对后注浆钻孔桩的侧摩阻力的影响进行了试验研究,注浆后桩的极限承载力提高了 1~2 倍。德国 Biltungert Berger 公司曾进行桩侧、桩端后注浆试验研究,提出后注浆的方法:压力腔法、压力箱法、压力柱塞法、喷射浆液法。

试验结果表明,桩的承载力明显提高,沉降大大减小。

1983年,Stocker描述了一种袖阀管/压力腔组合注浆装置(图1-9),为了提高桩侧摩阻力,在桩身混凝土浇注1~2天后,以5MPa的压力进行注浆,若需要可重复进行。为提高桩端阻力,间隔相同的时间,以6MPa的压力进行注浆。图1-10为直径570mm的桩在注浆前后的荷载-位移关系曲线,注浆后极限承载力提高1倍。

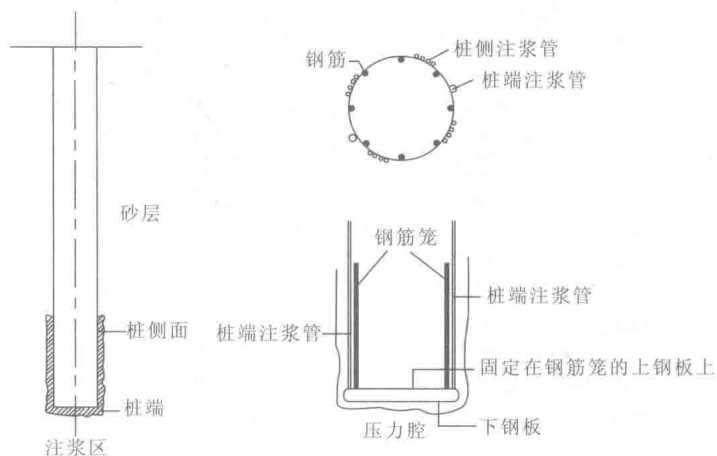


图 1-9 袖阀管/压力腔组合注浆装置(Stocker,1983)

1984年,Sliwinski和Fleming报道了在中东某一场地对两根直径1.5m的桩,一根注浆、一根不注浆得到的对比数据,见图1-11。在相同的荷载作用下,注浆桩的沉降量为8mm,而未注浆桩的沉降量为60mm。注浆后承载性能得到明显的改善。

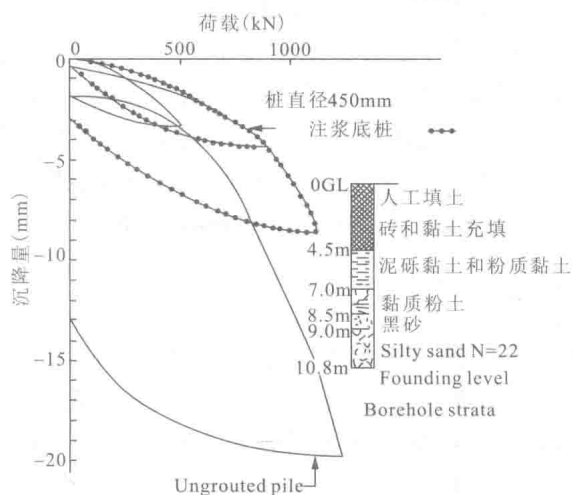


图 1-10 注浆前后桩的 $P-S$ 曲线

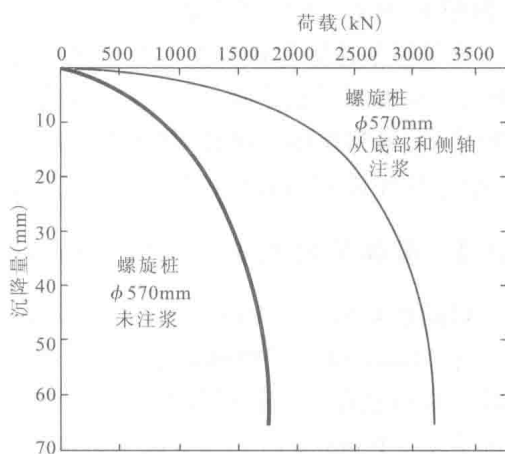


图 1-11 U 型管注浆前后桩的 $P-S$ 曲线

另外,Sliwinski和Fleming应用一种U型注浆管,对桩端进行注浆,试验结果见图1-12。

1996年,Thompson介绍了8根采用不同注浆工艺形成的桩的试验结果,其中3根未注浆,1根进行桩端注浆,2根侧注浆,2根桩端桩侧同时注浆,直径皆为550~570mm,桩长6m。

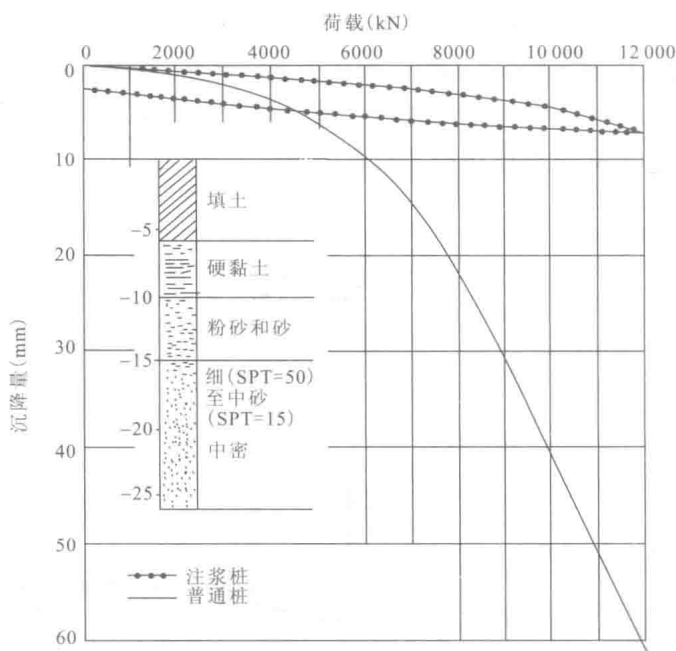


图 1-12 直径 1.5m 桩的荷载-位移关系曲线

侧注浆桩承载力比未注浆桩提高 50%~60%，桩端桩侧同时注浆桩承载力比未注浆桩提高 100%。

我国把后注浆技术应用于桩基础始于 20 世纪 80 年代初。1983 年，北京市建筑工程研究所在国内首先开发出预留注浆空腔方式的桩端压力注浆桩，并进行了室外试验。1988 年徐州市对一住宅楼桩基实施桩端后注浆试验，桩径 700mm，桩长 14.5m，极限承载力提高 110%。20 世纪 90 年代，国内许多地区均进行了钻孔后注浆试验，形成了比较完整的施工工艺，后注浆方法从桩端注浆发展到桩端与桩侧联合注浆；注浆装置也呈现出多样化的发展趋势，由最初的闭式，发展到开式注浆；由以往传统的一次性注浆，发展到循环注浆；由应用于中、小直径的中短桩，发展到应用于超长、超大直径的桩。2003 年，循环注浆工艺在国内首次应用于苏通大桥，通过对桩长 125m、直径 2.5m 的桩进行试验，取得成功，并应用于主塔基础。

1.3.2 后注浆对桩承载性能影响的研究进展

目前针对后注浆对桩承载性能影响机理的研究成果主要集中在现场试验研究方面。Stocker(1983)结合工程测试结果讨论了后注浆对灌注桩承载能力的影响。Bruce(1985)总结了后注浆对钻孔灌注桩承载力和沉降性质的影响、极限承载力的提高幅度与浆液体积之间的比例关系。Fleming(1993)分析了桩端注浆方法对钻孔灌注桩承载力和沉降的影响，考虑了桩端注浆时桩体的变位情况，指出注浆桩承载力的提高与桩侧土的作用有关。Mullins 等(2006)对桩端后注浆技术在非黏性土中的应用进行研究，认为后注浆桩端部承载力值为桩端承载力标准值乘以端部承载力因子(TCM)，TCM 由注浆压力及桩体位移确定。Miguel(2005)利用 cpt 技术，结合荷载传递曲线讨论了轴向荷载作用下后注浆对桩承载性能的影响。Su(2009)针对软黏土持力层经注浆处理后强度的变化进行了研究。Dapp 和 Brown(2010)对 Audubon

桥的大直径桩进行桩端注浆前后的承载力对比试验,结果表明桩端阻力提高了 2 倍多。Raymond 和 Castelli(2012)通过分析美国大量的工程实例和经验,对桩端后注浆钻孔桩的场地、施工、质量控制以及竖向荷载试验提供了一系列的操作指南和设计指南。

胡春林等(2001)除了考虑桩侧与桩端阻力增大值,同时还考虑了注浆量的影响。王旭等(1998)依据现场试验结果,探讨了桩端持力层为砾卵石层时桩端灌浆钻孔灌注桩的承载特性,结果表明:长径比为 54.1~57.1 时,桩侧阻力较常规桩提高了 2 倍,桩的沉降量大幅度减小,桩端阻力存在滞后反应。阮翔等(2009)针对福州地区试验结果,认为桩端后注浆灌注桩单桩极限承载力与挤土桩承载力相似,可参考预制桩(排土桩)承载力计算方法。马天抒等(2009)研究了黄土地区钻孔桩后注浆效果,结果表明:桩侧及桩端阻力较注浆前有显著增长。康景文(2009)等认为桩端敞开式注浆可以取得显著的效果,桩承载力可以提高近 50%,但桩侧注浆效果不明显,且无论注浆与否均呈现摩擦桩的特点。邹力等(2010)研究了群桩的后注浆效应,对于深厚软土层中的长、大群桩基础,桩侧注浆与桩端注浆对减小群桩沉降量都有显著的作用,桩端注浆控制沉降效果略优于桩侧注浆。蒋建平(2009)、张忠苗等(2009)基于超长桩的现场对比试验,分析了超长桩桩端岩土强度提高对桩身总侧阻力的影响,发现桩端岩土强度提高能使超长桩的桩身总侧阻力得到强化。黄生根(2004,2006)结合苏通大桥、新郑黄河公路特大桥、宁波枢纽北环线甬江特大桥以及多栋超高层建筑的静载荷及桩身应力测试结果,对多种条件下超长桩应用桩端后注浆的效果及其承载性能进行了深入分析,结果表明:桩侧阻力与桩端阻力是相互作用的,桩端注浆不仅可提高桩端阻力,还可改善桩侧土和桩土接触面的性质,使桩侧摩阻力也得到提高,且超长桩侧阻力增量对桩极限承载力的贡献大于桩端阻力,即桩端注浆存在大范围的强化效应。

2 后注浆的作用机理研究

2.1 土层注浆机理分析

浆液在地层中往往以充填、渗透、挤密和劈裂等多种形式与土体相互作用,具体的作用方式随土层的物理力学性质、浆液的种类和流变性能、注浆工艺及参数等变化,并相互转化或并存,如在渗透过程中存在劈裂现象,在压密过程中存在劈裂或渗透现象,在劈裂过程中存在渗透现象。但在一定条件下,浆液总是以某种运动方式为主,在渗透性很大($k>0.1\text{cm/s}$)的砂土中,一般以渗透作用为主,在渗透性小($k<10^{-5}\text{cm/s}$)的黏性土中,主要以劈裂作用为主。

2.1.1 渗透注浆

一般渗透注浆的必要条件是满足可注性条件。对于粒状介质,可注性用可注比来表示:

$$\frac{D_{15}}{G_{85}} \geq 15$$

$$\frac{D_{10}}{G_{95}} \geq 8$$

式中: D_{15} 和 D_{10} 分别为地层土颗粒在颗粒分析曲线上与15%、10%对应的直径; G_{85} 和 G_{95} 分别为注浆材料在颗粒分析曲线上与85%、95%对应的直径。

可注比并不是一项普遍适用的准则,注浆效果受细粒含量和颗粒级配的影响,因此一般可根据表2-1来判断可注性和浆液种类。

表 2-1 可注性评价表

有效直径 D_{10} (mm)	细粒含量 (%)	渗透系数 (cm/s)	注浆评价
>0.5		>0.1	可注水泥浆
$0.5 \sim 0.2$	<12	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	易注化学浆液
$0.2 \sim 0.1$	$12 \sim 20$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	适度可注化学浆液
<0.1	$20 \sim 25$	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	难注化学浆液

浆液在地层中的流动规律与流变性能有关。若不考虑时间影响,按浆液流变性能的不同,可将浆液分为牛顿流体和非牛顿流体。在非牛顿流体中,又以宾汉流体最为常见。牛顿流体的流变曲线通过原点,流动过程中的剪切应力与流速梯度成正比。而宾汉流体的流变曲线不通过原点,具有初始剪切应力(又称静切力)。因此,宾汉流体比牛顿流体具有更大的流动阻

力,在相同的条件下,牛顿流体比宾汉流体扩散得更远。水泥浆由牛顿流体转变为宾汉流体的临界水灰比接近于 1,见图 2-1。水灰比大于 1 时,为牛顿流体;水灰比小于 1 时,为宾汉流体。在实际工程中,常用的水灰比在 0.5~0.8 之间,属宾汉流体范围。

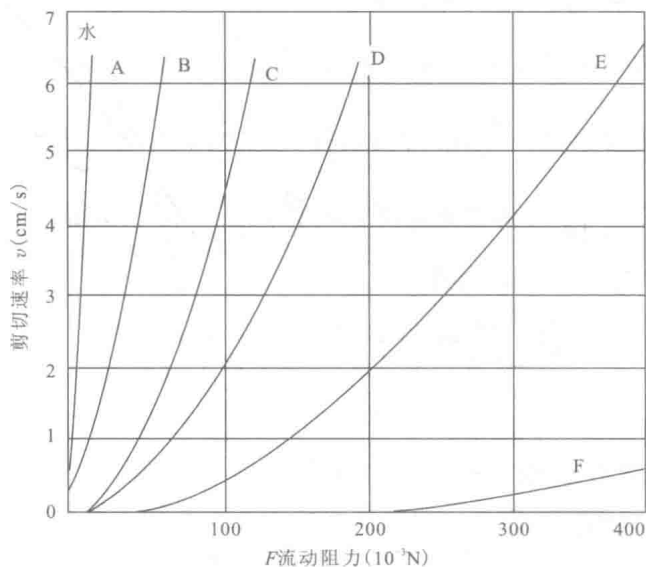


图 2-1 水泥浆流动曲线

A 为水;B 为 $W/C=1$;C 为 $W/C=0.5$;D 为 $W/C=0.66$;E 为 $W/C=0.55$;F 为 $W/C=0.45$

2.1.1.1 牛顿流体的渗透公式

1) 牛顿流体的球面扩散公式

Maag 假设浆液为牛顿流体,浆液从注浆管底端注入地层,注浆源为点源,浆液在地层中呈球状扩散。推导出以下公式:

$$r=3\sqrt{\frac{3k \cdot h_1 \cdot r_0 \cdot t}{\beta \cdot n}}$$

式中: r 为浆液的扩散半径(cm); k 为砂土的渗透系数(m/s); h_1 为注浆压力水头(cm); r_0 为注浆管半径(m); t 为注浆时间(s); β 为浆液黏度与水黏度之比; n 为砂土孔隙率(%)。

2) 牛顿流体的柱面扩散公式

若注浆源为点源,浆液在地层中呈柱状扩散,其扩散半径表达式为:

$$r=3\sqrt{\frac{2k \cdot h_1 \cdot t}{n \cdot \beta \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}}$$

式中: r_1 为浆液在地层中扩散半径(m)。

2.1.1.2 宾汉流体的渗透公式

以下为推导宾汉流体在地层中的渗透公式。

1) 宾汉流体的柱面扩散公式

渗透微分方程为: