

高喷插芯组合桩 承载性能与计算分析

任连伟 著

中国建筑工业出版社

高喷插芯组合桩承载性能与计算分析

任连伟 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高喷插芯组合桩承载性能与计算分析/任连伟著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-112-16038-9

I. ①高… II. ①任… III. ①组合桩-承载力-工程分析 IV. ①TU473. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 259346 号

高喷插芯组合桩 (简称 JPP 桩) 是一种新型的组合桩, 由高压旋喷水泥土桩和预应力管桩芯桩组合而成, 具有承载力高、施工速度快、造价低等优点。JPP 桩综合了预应力管桩强度高、刚度大和高压旋喷桩侧摩阻力大、穿透能力强的优点, 使两种桩型的优势充分发挥, 从而达到甚至超过同直径预应力管桩承载效果的目的。

本书对 JPP 桩的荷载传递机理、承载力计算方法以及构造组合优化等方面通过试验研究、数值模拟以及理论分析等方法进行了研究。通过足尺模型试验研究了 JPP 单桩和带承台 JPP 单桩的荷载传递机理, 并对试验结果作了对比分析。依据 JPP 桩本身的构造特点, 提出了承载力的简化计算公式, 并通过现场工程实测资料确定了桩侧摩阻力的调整系数, 建立了 JPP 单桩竖向承载特性的变分解析法, 推导出 JPP 单桩荷载传递的简化计算方法。

本书可供岩土工程设计、施工人员及大专院校岩土工程专业师生参考使用。

* * *

责任编辑: 万 李
责任设计: 张 虹
责任校对: 王雪竹 赵 颖

高喷插芯组合桩承载性能与计算分析
任连伟 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
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8³/₄ 字数: 210 千字
2013 年 12 月第一版 2013 年 12 月第一次印刷
定价: 26.00 元
ISBN 978-7-112-16038-9
(24818)

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)

前 言

随着国家经济建设的蓬勃发展，全国城镇建筑、市政建设、基础设施建设呈现出日新月异的兴旺景象。在我国沿海地区的建筑工程施工中，由于普遍存在地基土软弱，承载力偏低的特点，因而有建设就离不开地基处理，有建设就离不开地基与基础施工，用于地基处理的费用，每年达数百亿元。因此近几年在建筑物的基础工程中，新技术、新工艺、新桩型不断涌现，一些工程质量安全可靠、工程施工方便快捷、工程造价合理节约的施工手段和措施越来越受到重视。

高喷插芯组合桩（Jet grouting soil-cement-Pile strengthened Pile，简称 JPP）是在高压旋喷水泥土中插入预应力管桩作为芯桩而形成的一种新型组合桩。由高压旋喷水泥土桩与强度很高的芯桩两部分组成。高压旋喷桩首先施工，高压水泥浆通过钻杆由喷嘴中喷出，形成喷射流，边旋转边喷射，以此切割土体并与土拌合形成水泥土，在土体中形成大于芯桩直径的水泥土桩，然后插入芯桩，组合成桩。利用旋喷工艺加固桩周土、穿透硬土夹层或对桩端土进行加固，提高桩侧摩阻力和端阻力，芯桩具有足够的桩身截面强度，能满足承载要求，通过高压旋喷水泥土桩和芯桩的有效结合，使单桩承载力显著提高。具有桩体承载力高、工程造价低的优点。目前 JPP 桩已在天津滨海新区、唐山地区的市政工程、工业厂房、油罐区以及工民建工程中得到了成功的应用，取得了良好的经济效益和社会效益。但作为一项新技术，目前还没有开展系统的研究，相关的荷载传递机理、设计计算理论、桩体组合构造优化等方面尚未开展系统的、深入的研究，这些成为 JPP 桩进一步推广的瓶颈之一。所以开展相关的试验及理论研究，既具有理论上的重要意义，同时也具有工程意义。通过足尺模型试验、数值模拟以及理论分析等方法对 JPP 桩荷载传递机理和承载力计算方法进行了较为系统的研究。

本书内容共分 8 章：

1. 绪论：介绍了组合桩国内外研究现状，介绍桩基国内外试验研究方法和理论研究方法，提出了本书的研究内容和意义。

2. 高喷插芯组合桩技术及其特点：介绍了 JPP 桩的研发思路、施工工艺、技术优缺点及其适用范围。

3. 高喷插芯组合桩荷载传递机理足尺模型试验研究：依托大型桩基模型试验系统开展了同截面同尺寸 JPP 桩、混凝土灌注桩、高压旋喷水泥土桩足尺模型试验，得到了 JPP 桩在竖向荷载下的荷载传递规律，并对比分析了三种桩型的竖向承载特性。

4. 带承台高喷插芯组合桩荷载传递特性足尺模型试验研究及分析：以大型桩基试验模型槽为依托，开展了带承台 JPP 单桩足尺模型试验研究，通过预埋的钢筋应力计和土压力盒以及应变片等监测仪器对相关内容进行了直接测量，并与不带承台 JPP 单桩作了对比分析。通过对比分析，掌握了带承台 JPP 桩的荷载传递特性，并提出了与 JPP 单桩荷载传递特性不同和相同之处。

5. 高喷插芯组合桩承载力简化计算及影响因素 FLAC^{3D}数值分析：结合 JPP 桩本身的结构特点，提出了一种承载力的简化计算公式，并结合多个工程实例验证了其合理性；结合足尺模型槽试验，对影响承载力的各种因素进行了 FLAC^{3D}数值模拟分析，提出 JPP 桩结构优化设计；最后对 JPP 桩极限承载力进行了灰色预测。

6. 高喷插芯组合桩竖向承载特性的变分法分析：高喷插芯组合桩是一种复合材料桩，同一截面上由两种不同材料组成，不同于一般的单一材料桩。采用最小势能原理得到了 JPP 桩荷载沉降关系的显式变分解答，并对影响 JPP 桩承载性能的各种因素进行了分析，提出合理化建议。

7. 高喷插芯组合单桩荷载传递机理简化分析方法：以传递函数法为基础，吸取已有的研究成果，结合 JPP 桩不同的组合特点，采用理想弹塑性模型模拟桩侧土体的非线性，弹性模型模拟水泥土与芯桩界面的荷载传递特性，双折线函数模拟桩端土的硬化特性。基于荷载传递法，考虑了水泥土与芯桩界面摩擦、水泥土或芯桩与桩周土界面摩擦，提出了分析不同组合形式的 JPP 桩荷载传递的简化计算方法，并与模型试验结果进行了对比，然后采用该方法对 JPP 桩荷载传递机理及其影响因素进行了分析。

8. 结论：对本书的整个内容进行了总结，并对今后从事该研究的相关人员提出了建议。

在本书的撰写过程中，得到了河海大学刘汉龙教授的悉心指导，审阅了全书并提出许多宝贵意见，对此万分感谢。

天津市华正岩土工程有限公司雷玉华总经理和张华东总工提供了宝贵的现场设计及检测资料，河海大学岩土力学研究所提供了大型桩基模型试验加载系统，在此表示感谢。在本书的写作过程中，参考了一些国内外同行的研究成果，对被引用研究成果的同行和作者表示诚挚的谢意。

本书的出版，得到了河南理工大学刘希亮博士生导师、顿志林教授；河海大学孔纲强副教授、陈育民副教授；河南理工大学张敏霞副教授、王光勇副教授、秦本东副教授、郭佳奇副教授等的大力支持和帮助，土木工程河南省一级重点学科建设经费、河南省重点攻关项目（122102210119）、国家青年科学基金（41102169）、河南理工大学博士基金（B2010-52）对本书出版给予了资助，在此一并表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有谬误之处，敬请专家、读者批评指正。

作者于河南理工大学
2013 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论 1

1.1 桩的分类及其发展 1

1.2 组合桩发展及其研究现状 2

1.2.1 国外研究现状 2

1.2.2 国内研究现状 3

1.3 桩基国内外研究现状 11

1.3.1 试验研究 11

1.3.2 理论研究 15

1.4 本书研究背景意义 19

1.4.1 JPP 桩研究现状及存在的问题 19

1.4.2 研究意义 19

1.5 主要研究内容和技术路线 20

1.5.1 主要研究内容 20

1.5.2 技术路线 21

第 2 章 高喷插芯组合桩技术及其特点 22

2.1 研发思路 22

2.2 桩型构造 22

2.2.1 预应力混凝土桩内芯 23

2.2.2 高压旋喷桩 24

2.3 施工工艺 28

2.3.1 施工机械 28

2.3.2 施工作业 28

2.4 质量检测 32

2.5 JPP 桩技术优点和缺点 33

2.6 适用范围 33

2.7 本章小结 34

第 3 章 高喷插芯组合桩荷载传递机理足尺模型试验研究 35

3.1 大型桩基模型试验系统简介 35

3.1.1 试验场所（模型槽） 35

3.1.2 加载系统 37

3.1.3 测量系统 39

3.2 试验目的及方案 39

3.2.1 试验目的 39

3.2.2 试验方案 40

3.3 模型桩制作 41

3.3.1	试验准备	41
3.3.2	模型桩施工	43
3.4	试验结果分析	47
3.4.1	承载力分析	48
3.4.2	桩身轴力	49
3.4.3	内外摩阻力	50
3.4.4	JPP 桩承载力组成	51
3.5	本章小结	52
第 4 章	带承台高喷插芯组合桩荷载传递特性足尺模型试验研究及分析	54
4.1	仪器布置	55
4.2	试验结果分析	55
4.2.1	荷载分担比	56
4.2.2	轴力分布	57
4.2.3	内外摩阻力	58
4.2.4	荷载传递特性	59
4.3	JPP 群桩数值模拟分析	60
4.3.1	模型验证	60
4.3.2	不同桩数的影响	61
4.3.3	不同桩间距的影响	62
4.3.4	不同桩长的影响	63
4.3.5	不同组合形式的影响	63
4.3.6	不同水泥土模量的影响	64
4.4	本章小结	65
第 5 章	高喷插芯组合桩承载力简化计算及影响因素 FLAC ^{3D} 数值分析	66
5.1	承载力简化计算公式	66
5.1.1	简化计算公式	66
5.1.2	计算公式验证	68
5.1.3	调整系数的确定	68
5.2	破坏模式	69
5.3	承载力影响因素 FLAC ^{3D} 数值分析	70
5.3.1	模型建立	70
5.3.2	接触面模型	70
5.3.3	模拟结果分析	71
5.4	JPP 桩极限承载力的灰色预测	76
5.4.1	非等步长 GM (1, 1) 模型	76
5.4.2	应用实例分析	79
5.5	本章小结	85
第 6 章	高喷插芯组合桩竖向承载特性的变分法分析	86
6.1	群桩的变分理论	86
6.1.1	群桩变分分析	86
6.1.2	土体荷载位移函数	87

6.1.3	变分的矩阵表示	88
6.2	单桩的变分解法	89
6.3	JPP 桩单桩变分解法	90
6.3.1	单桩变分矩阵表示	90
6.3.2	实例分析	91
6.4	本章小结	94
第 7 章	高喷插芯组合单桩荷载传递机理简化分析方法	95
7.1	桩身荷载传递简化分析方法	95
7.1.1	模型简化及基本假定	95
7.1.2	JPP 桩荷载传递方程的建立	96
7.2	实例验证	99
7.3	JPP 桩荷载传递影响因素分析	101
7.3.1	不同组合形式	101
7.3.2	水泥土厚度	106
7.3.3	水泥土弹性模量	110
7.3.4	刚度系数比	113
7.4	本章小结	118
第 8 章	结论	120
参考文献		123

第 1 章 绪 论

桩是一种古老且迄今仍在广泛应用和不断发展完善的基础形式^[1]。桩基技术的发展大致经历了三个阶段：①19 世纪以前的木、石等天然材料桩时期，施工简单，效用单一；②19 世纪到 20 世纪初，由于水泥工业的发展，桩材主要为混凝土和钢筋，且同时相关的桩基设计理论也得到初步发展，如土力学的建立等；③第二次世界大战以后，这个时期桩材、桩型增多丰富，桩基技术和理论的范围和深度都得到很大提升。随着桩型和施工工艺的推陈出新，桩基的有关理论和桩的效用上都发生了许多质的变化，复合桩基、疏桩理论、桩基逆作等的提出，以及桩基规范和桩基检测技术也得到长足的发展。

桩基的作用主要有三方面：①通过穿过软弱的压缩性高的土层，利用自身的刚度把上部结构的荷载传递到强度更高、压缩性更低的土层或岩层上，以满足建筑物对承载力和沉降的要求；②作为基坑支护和围护结构，以承担水平荷载；③作为防渗止水构件，如应用于基坑开挖的高压旋喷止水帷幕桩和钢板桩等。

现在随着经济的发展、社会的进步，建筑的规模不断扩大，地基处理的深度也不断加大，桩基作为一种深基础，其采用率也不断提高。据不完全统计^[2]，我国每年桩用量在几百万根以上甚至更多，桩基工程占一般土建工程造价的 20%~30%。

1.1 桩的分类及其发展

由于桩的类型繁多以及其功能多样，因此为能表达或限定各类桩的特性，使桩基所隐含的信息有一定程度的显露，使桩的设置过程清晰化，需要对其进行分类，如表 1-1 所示。

随着建筑物上部结构对基础的要求不断提高、新型建筑材料的开发和应用、工期和工程造价的要求，桩基础有以下发展趋向^[3]：

- (1) 基于高层、超高层建筑物及大型桥主塔基础等承载的需要，桩的尺寸向长、大方向发展。
- (2) 基于老城区改造、老基础托换加固、建筑物纠偏加固、建筑物增层以及补桩等需要，桩的尺寸向短、小方向发展。
- (3) 向攻克桩成孔难点方向发展。
- (4) 向低公害工法桩方向发展。
- (5) 向扩孔桩方向发展，扩孔的成型工艺有钻扩、爆扩、冲扩、夯扩、振扩、锤扩、压扩、注扩、挤扩和挖扩等种类。
- (6) 为了提高单桩承载力（桩侧摩阻力和桩端阻力），国内外大量发展异形桩。异形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、外方内异形空心桩、十字形桩、Y 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、螺旋桩、从一面削尖的成对预制斜桩、多分支承载力盘桩、DX 桩及凹凸桩等。

(7) 为了消除一次性公害和挤土效应, 桩向埋入式桩方向发展。所谓埋入式桩工法是将预制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的总称。

(8) 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, 因此桩向组合式工艺桩方向发展。

(9) 随着对打入式预制桩的要求越来越高, 诸如高承载力、穿透硬夹层、承受较高的打击应力及快速交货等要求, 桩向高强度桩方向发展。

(10) 向多种桩身材料方向发展。本书所研究的对象高喷插芯组合桩即是由多种桩身材料组成, 且采用两种工艺成桩的一种组合桩。

基桩分类		表 1-1
分类依据	桩种	备 注
桩身材料	天然材料桩	木桩、石桩、灰土桩、石灰桩、碎石桩等
	钢筋混凝土桩	桩体配置钢筋, 预制或现场灌注
	钢桩	实心桩、开口桩、管桩、钢板桩等
	水泥土桩	深层粉喷、旋喷、加筋水泥搅拌桩
功能	支承桩	支承建筑物竖向及水平自重和地震作用为主
	加固桩	改善桩周土体, 起地基加固作用
	支护桩	对基坑和坡体起支护作用
荷载传递机理	摩擦桩	竖向荷载主要由桩侧摩阻力承担
	摩擦端承桩	竖向荷载主要由桩端极限阻力承担
	端承桩	竖向荷载主要由桩端阻力承担
	端承摩擦桩	竖向荷载主要由桩极限阻力承担
成桩挤土效应	挤土桩	桩入土时桩周土受到排挤
	少量挤土桩	土可进入桩空心界面, 有少量排土
	非挤土桩	成桩过程无排土作用
承受荷载方向	承受竖向压力荷载桩	主要承受竖向压力
	承受竖向拔力荷载桩	主要抵抗竖向拔力
	承受横向荷载桩	分为主动桩和被动桩
截面形状	常见截面形状	圆形、方形、圆环形、三角形等
	异形	Y、T、H、X、I 形截面等
成桩方法	工厂预制	主要指普通钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土桩
	现场灌注	成桩工艺丰富多样, 按桩土相互作用分为挤土、少量挤土、非挤土灌注桩

1.2 组合桩发展及其研究现状

1.2.1 国外研究现状

组合桩的前身是日本 1976 年发明的一种地下连续墙施工工法^[4 6], 称为 SMW (Soil

Mixing Wall) 工法。它是在水泥土搅拌桩和地下连续墙基础上发展起来的,在水泥搅拌桩初凝以前,插入 H 型钢作为受力体,形成具有一定强度和刚度的连续无缝的劲芯水泥土结构。此工法在美国、法国、东南亚地区和我国的台湾省均有广泛的应用。工程实践表明,该工法利用了水泥土的抗压性、抗渗性和钢材的抗弯性,具有止水性好、刚度高、构造简单、施工速度快、占地少、无泥浆污染、型钢可回收、成本较低等优点。

20 世纪 90 年代,日本近 20 家大公司和科研机构合力开发了一种“肋型钢管水泥土组合桩”,其主旨即力图保持预制桩、灌注桩的各种优点,又能从根本上消除其许多不足。其施工顺序如下:①先用大型搅拌钻杆将水泥浆从其喷口以高压喷入地基并强行与原状土搅拌,自地面徐徐往下,直至到达预定深度而形成一浆状水泥土柱;②将搅拌钻杆自下而上边搅边提,直至地面;③将一表面带肋的钢管插入水泥土中,形成钢管水泥土组合桩。其所用水泥浆的水灰比 1.65,进入持力层后改用较稠的乳浆,乳浆用量约为被搅拌土体积的 80%。水泥土的桩身抗压强度为 0.5~1.0MPa,桩端为 6~10MPa。肋型钢管系专门卷制。钢管外表通常有肋,进入持力层后则内外有肋,肋呈螺旋状,螺旋角度小于 40°,螺距 40mm,肋高 3mm,钢管壁厚 6~22mm 不等。抗拔试验表明,单面有肋的钢管与水泥土之间的粘结力为光面钢管的 8 倍,双面有肋的更高。因此,这种钢管作为桩体主要受力骨架,能与水泥土形成整体而协同工作,不发生滑移。测试表明,桩顶荷载可用钢管肋有效地传递给水泥土。水泥土又将荷载有效地传递给桩周和桩底土。原位桩模型载荷试验表明,肋型钢管水泥土组合桩中,钢管与水泥土的沉降几乎相同,可以认为钢管与水泥土的整体性良好。

日本在大型模型槽中进行了三根桩的成桩试验,并进行了载荷对比试验。桩长 10m,桩径 1m,插入的肋型钢管直径分别为 500mm、600mm、750mm,所用土样为分层碾压均匀的粉质黏土。3 根桩的单桩承载力均达到 1200kN,按水泥土外径反算得到桩侧和桩端单位阻力均高于普通的灌注桩的发挥值。这种新桩型把软土地基加固的有效手段——深层搅拌技术与大直径灌注桩和钢管桩三者融为一体,扬其长而避其短,是典型的水泥土组合桩形式之一。

日本合成钢管桩工法协会在“肋型钢管水泥土桩”的基础上,经过十几年的研究开发,总结经验,研发了先进的 HYSC 工法,其桩径(即水泥土桩桩径)已达到 1600mm,钢管直径达 1400mm,桩长达 60m,目前主要应用于单桩竖向承载力要求较高的道桥工程桩基础。

Pin Pile 是近年来在欧美等地区广泛使用的一种组合桩^[7],它是在钻孔灌注桩中插入钢管或钢棒制成,桩径一般为 100~300mm。Pin Pile 一般作为岩石、砂砾和卵石场地上的端承桩使用,特别使用于原有建筑物的加固。试验表明 Pin Pile 与一般灌注桩相比,不仅能大幅度提高承载力,而且能减少桩顶沉降。

1.2.2 国内研究现状

(1) SMW 工法

我国对 SMW 工法的研究和应用始于 20 世纪 80 年代后期。1988 年冶金工业部建筑研究总院立项研究,并于 1994 年通过建设部技术鉴定。其所用的芯桩,除国外常用 H 型钢外,还根据国情研制了钢筋笼和轻型角钢组合钢架等,适用于地下开挖深度为 6~10m 的基坑。

1994 年上海市基础工程公司把 SMW 工法首次应用于上海软土地区（上海环球世界广场，基坑深 8.65m，桩长 18m），取得了成功；1995 年上海市隧道公司施工技术研究所和江阴建筑安装总公司机械施工公司也共同开发了型钢水泥土复合桩，对其进行了较系统的试验研究，在回收 H 型钢设备的技术上取得了重大突破，并于 1997 年初将其研究成果应用于上海申海大厦^[8]，该课题于 1997 年通过上海市科委技术鉴定。1998 年王健等^[9]通过上海隧道工程股份公司施工技术研究所对 SMW 工法的试验研究和几个工程实践经验的深入分析，提出了 SMW 工法的设计、技术方法。此后，SMW 工法在国内广泛应用并取得了成功^[10-17]，并且许多国内学者对 SMW 工法进行了大量的试验研究和理论分析^[18-24]，取得了很好的研究成果。

(2) 混凝土芯水泥土组合桩

国内研制开发劲性水泥土桩始于 1994 年，沧州市机械施工公司和河北工业大学在沧州进行了一组新型桩的试验，即在水泥土搅拌桩体内插入预制钢筋混凝土空心电线杆称为组合桩，并进行静载试验。水泥土搅拌桩桩径 500mm，桩长 8m，电线杆长 4.5m，外径 300mm，内径 150mm，同时制作同规格水泥土搅拌桩进行对比。试验表明，组合桩平均极限承载力达到 450kN，而水泥土搅拌桩只有 160kN。组合桩由于在桩顶下 2m 处电线杆被压碎而破坏。基于理想的试验结果和分析论证，沧州市机械施工有限公司将这种桩型申报专利，命名为“旋喷复合桩工法”，成为国内水泥土组合桩的雏形。混凝土芯水泥土组合桩示意图如图 1-1 所示。

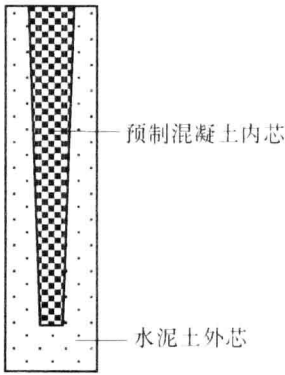


图 1-1 混凝土芯水泥土组合桩示意图

1998 年，由天津大学、沧州市机械施工公司、河北工业大学和天津质检总站等单位组成课题研究组^[25]，开展对劲性水泥土组合桩的系列试验和应用研究，先后在天津大学六里台小广场，杨村国税局住宅工地和红桥房地产交易大厦工地三处进行了三批共 45 根原型桩的对比试验工作，初步掌握了该桩型的工作特性，设计方法，施工工艺和检测方法，设计改装了插桩专用设备，编制了企业标准“组合桩设计、施工规定”，并应用于杨村国税局 7 层砖混住宅楼试点工程。所得出的结论为：劲性搅拌桩承载力是同比混凝土灌注桩的 1.35~1.54 倍，是同直径搅拌桩的 4.4~5.38 倍；劲性搅拌桩实测桩侧摩阻力是钻孔灌注桩的 1.41~1.62 倍，是勘察报告取值的 1.26~1.47 倍。

2000 年 10 月在河北工业大学南院草坪进行了模型桩试验^[26]，模型试验桩共 3 根，其中两根为劲性搅拌桩 Z₁、Z₂，另一根为水泥土搅拌桩 Z₃。三根桩的外包尺寸、水泥掺入比、水灰比等指标及水泥土搅拌桩成桩方法均完全相同。其中劲性搅拌桩 Z₃ 的桩端进行了掏空处理，以考查其侧摩阻力特性。三根桩中均埋有测试元件，以测出桩中轴力等其他参数。试验结果表明：Z₁、Z₂、Z₃ 的极限承载力标准值分别为 45.5kN、35kN、31.5kN。在整个加载过程中，芯桩承担了大部分的桩顶荷载，并通过其桩侧和桩端传递给水泥土，桩侧水泥土同时承担了上部水泥土传来的压力和芯桩传递的剪力以及桩侧土的侧摩阻力。芯桩桩顶荷载按一定比例传递给桩侧和桩端水泥土。

2000 年 11 月在河北工业大学结构实验室进行水泥土的抗压强度试验和测定芯桩与水泥土共同工作情况的抗拔试验^[27]。试验结果表明：混凝土芯体与水泥土之间的粘结强度

与水泥土的强度有密切的关系，粘结强度随水泥土强度的增加而增大，存在近似的线性关系。粘结系数的值在 0.174~0.213 之间变化，平均值为 0.194，即其数值约为水泥土试块无侧限抗压强度的 0.194 倍，略小于水泥土本身抗剪强度（0.2~0.3）的数值。

1998 年，受上海市建筑技术发展基金会的委托，上海现代技术设计集团江欢成设计事务所、上海市基础工程公司及江阴建筑安装总公司机械施工分公司等单位，作为负责单位自筹资金，于 1998 年 9 月 11 日在上海市万里小区进行了 6 根混凝土水泥土复合桩的试验，施工时采用了“SMW”工法的施工设备，取得了成功。所得结论为：18m 长单桩极限承载力 1200kN，24m 单桩极限承载力 2000kN，与微型预制桩相比，每单位承载力的造价要低 30% 左右。1999 年 2 月 10 日，由上海市建委科技委组织了评审，其评审意见为：该复合桩造价低，承载力高，施工对环境的挤土、噪声、污染等影响较小，桩型符合我国国情，可以在以沉降为主的工程中使用，并指出应进一步进行受力机理、垂直承载力和沉降计算方法、搅拌桩工艺、水灰比等研究，使科学技术尽快转化为生产力。2000 年 3 月，该桩型在上海青浦区赵港税务所办公楼正式使用，该工程为四层框架结构，使用该复合桩较原桩筏基础方案降低造价 32%。

董平等^[28-30]在上海、江阴两地混凝土芯水泥土搅拌桩试桩和实际工程应用的基础上，分析了该桩竖向承载力的发挥机理、破坏模式和极限承载力。研究表明：混凝土芯水泥土搅拌桩施工方便、单桩承载力高、沉降量小、造价低廉，且施工对周围环境影响小；混凝土芯水泥土搅拌桩竖向荷载首先由混凝土内芯承担，然后通过混凝土内外芯界面和桩土界面的侧摩阻力，形成荷载从混凝土内芯到水泥土外芯桩再到桩周土体的双层扩散模式，传递到复合桩端的荷载不超过总荷载的 7%，其工作方式为纯摩擦桩。另外，用有限元分析了该桩在竖向荷载下的力学性状，包括桩土和桩内外芯应力比，荷载的传递，桩侧塑性区分布以及沉降特性等。

岳建伟等^[31]对 3 根 14m 长混凝土芯水泥土搅拌桩的载荷试验，分析了桩身轴力和桩周的侧摩阻力的分布及影响组合桩承载力的因素。试验和有限元结果表明混凝土桩的插入改变竖向荷载的传递规律，形成了从混凝土桩到水泥土再到土的传递模式，更有效地发挥了桩周的侧摩阻力；水泥土的固化效应、混凝土桩的挤土效应和混凝土桩的荷载传递是组合桩高承载力的主要来源。另外，为了探讨了组合桩在水平荷载作用下的承载力和破坏模式，对三根 14m 长桩做了水平载荷试验^[32]，实测得到该桩在水平荷载作用下桩与土共同作用下的工作性状和破坏特征，分析了组合桩受水平力作用时的临界和极限荷载、破坏模式、地基土的水平抗力比例系数以及桩帽对组合桩抗水平力的有利作用。为合理地评价组合桩的水平承载力，探讨了组合桩在水平荷载作用下的计算方法：临界荷载法和转折点法，并给出计算公式。试验和分析结果表明：组合桩具有较好地抵抗水平荷载的能力，有桩帽的组合桩水平受荷性状优于无桩帽的组合桩，桩帽使组合桩由水泥桩和外侧的水泥壳之间相互分开的破坏模式变为外侧的水泥土和土之间分开的模式，保证组合桩在水平荷载下的完整性，用转折点法计算组合桩的水平承载力更为合理。

（3）复合灌注桩

刘金砺等研发的水下干作业复合灌注桩（专利号：982182759）是由水泥土环内包钢筋混凝土灌注桩复合而成^[33,34]，成桩基本工艺为：①搅拌水泥土环桩，采用一种特制的水泥土环桩搅拌器实施浆液搅拌完成，即起到隔水帷幕的作用，形成干作业条件，并构成

复合桩身的外环，这是本桩型的关键技术；②钻芯取土，钻取过程既无挤土效应，也无泥浆排放，可采用长螺旋（与搅拌器共一主机），也可用短螺旋，其关键是与环形搅拌桩实现同心，并确保其垂直度；③钢筋混凝土芯桩施工，按常规干作业成桩工艺安置钢筋笼和灌注混凝土，确保不发生离析，尽可能实施振捣。施工工艺如图 1-2 所示。

由此可见，复合灌注桩可在地下水位以下全过程干作业，即可避免泥浆污染，减少浆渣运量，又可克服泥浆护壁灌注桩沉渣、泥皮、水下灌注等影响成桩质量的固有缺陷。同时水泥土环桩的搅拌过程，不同于密集格栅形搅拌桩由于浆体注入量大而隆起，芯桩采用钻取土芯成桩，不同于搅拌桩中挤土插入预制芯桩，因此成桩过程基本不存在挤土效应。图 1-3 是开挖水泥土环桩图。

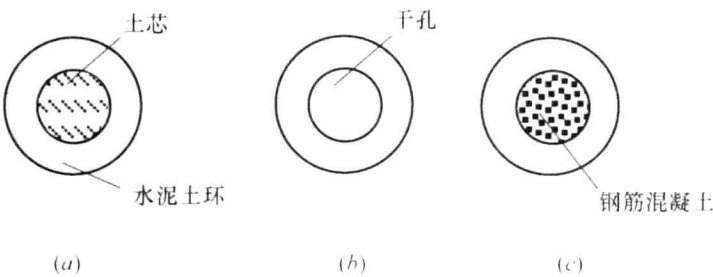


图 1-2 水下干作业复合灌注桩成桩基本施工工艺
(a) 搅拌水泥土环桩；(b) 钻取土芯取孔；(c) 施工钢筋混凝土芯

复合灌注桩在承载性能上面集合了水泥土桩侧摩阻力高和灌注桩身刚度大两方面的优势，从而使其承载力性能优于水泥土桩和灌注桩。对两根复合灌注桩和两根普通灌注桩的对比试验表明其单桩承载力显著高于普通灌注桩，并且单位承载力费用明显降低。

(4) 浆固碎石桩

浆固碎石桩是河海大学岩土所一项专利^[35-37]，是近年来开始推广应用的用于提高碎石桩强度的软基处理的新方法，直径为 300~700mm，桩长可达 30m 以上，已在杭千高速公路等工程中得到了成功应用。该技术是

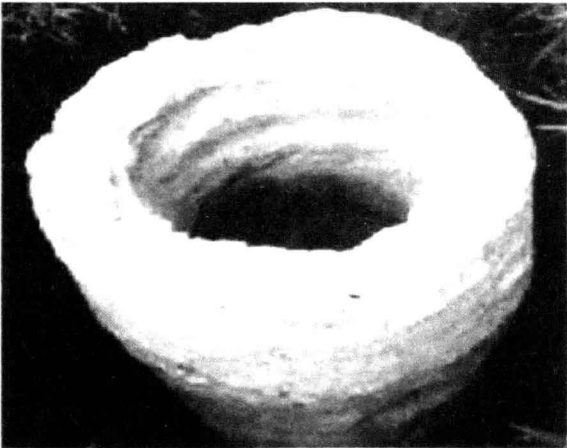


图 1-3 开挖水泥土环桩土

利用钻机按设计直径，钻进至设计深度成孔，放入导向管和注浆管，然后投放石料。在投放石料的过程中，用注浆管放水清洗孔，石料投放完成后进行注浆，固结成桩。浆液除在孔中注浆成桩外，也向周围土体渗透。浆固碎石桩与其他桩型相比，有其自身的特点。由于路基这种复合地基并不需要太高的强度或太大的直径，而浆固碎石桩的直径可选的范围较大，可以选用较小的直径和较低的混凝土强度，因此节约了造价；其次，浆固碎石桩施工所占的场地较小，在施工过程中无振动无噪声、不挤土，对周围建筑物影响很小，且施工机械轻便，速度快，同时在注浆过程中浆液可同时改善桩间土的强度及桩土摩擦阻力，提高承载力。

(5) 钻孔灌注桩后压浆技术

钻孔灌注桩是当前高层建筑和桥梁基础的主要桩型。传统灌注桩成孔工艺导致桩底沉渣和桩侧泥皮等固有缺陷，造成桩端阻力和桩侧摩阻力显著降低。钻孔灌注桩后压浆技术可有效地消除桩底沉渣和桩侧泥皮的不利影响，是一种有效提高钻孔灌注桩性能、节约工程成本的先进施工工艺。在国外，20 世纪 20 年代开始，英、美等发达国家开始研究后压浆施工工艺并取得了成功。到目前为止，已形成了几十种成熟的施工工艺，并制定了完善的设计方法和施工规范。从 20 世纪 80 年代开始，我国越来越多的高层建筑的桩基础应用后压浆技术来提高桩的承载力，尤其是最近大规模开展的对沉降严格要求的高速铁路的桩基础也应用后压浆技术来控制沉降，其施工工艺和计算方法也得到不断的提高。

钻孔灌注桩后压浆技术^[38]，是使水泥浆液在高压下渗透、充填和挤密，与沉渣、泥皮、桩周和桩端土体发生物理化学固结，增大了土体和桩端的强度，改变了桩的受力类型，提高了桩侧摩阻力和端阻力，从而提高了单桩的承载力。后压浆按在桩身的位置可分为桩端压力注浆、桩侧压力注浆、桩端桩侧联合注浆 3 种，如图 1-4 所示。

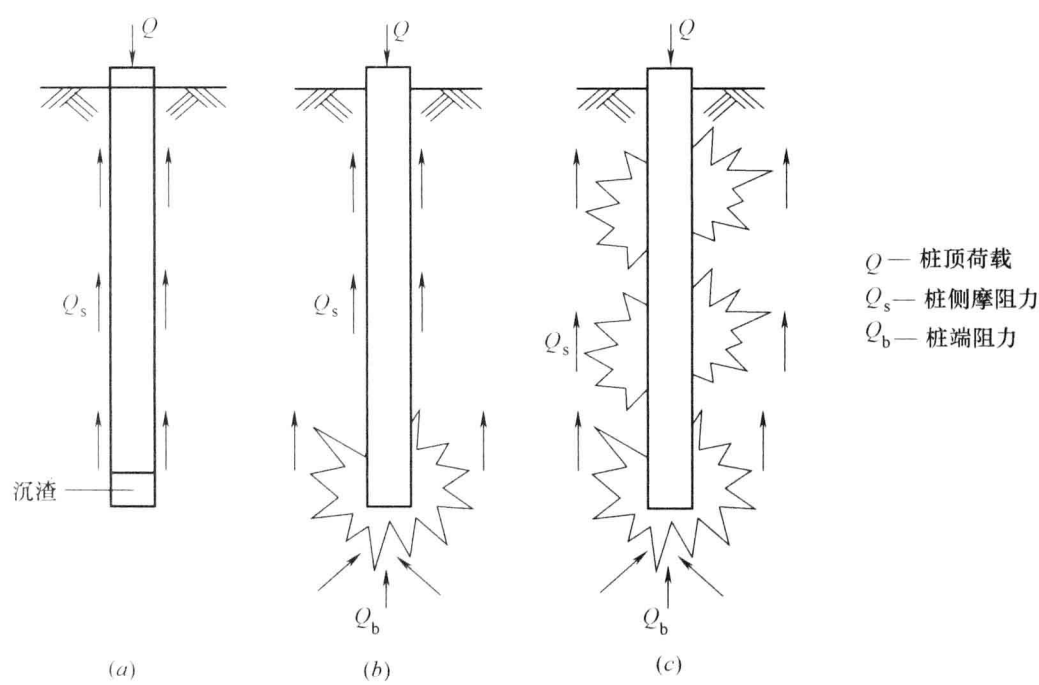


图 1-4 后压注浆的灌注桩受力特性
(a) 未注浆；(b) 桩端注浆；(c) 桩端和桩侧联合注浆

布克明等^[38]通过对在苏通大桥中应用了桩底后压浆技术的超长直径桩的试桩静载荷试验得出，压浆后极限承载力测试值是压浆前的 1.48~2.0，压浆后桩端阻力是压浆前的 2.46~7.21 倍，表明利用后压浆技术达到了节约工程投资、提高工程施工质量及可靠性的目的，产生了较大的技术经济效益和良好的社会环境效应。

黄生根等根据某大厦及临近场地试桩的静载荷及桩身应力测试结果^[39]，对压浆后桩的承载性能进行了深入分析。未压浆桩的荷载-沉降关系符合双曲线函数，而压浆后桩的荷载-沉降关系符合幂函数。在极限状态时桩端阻力占总荷载比例为 6.4%~18.4%，桩侧阻力占总荷载比例为 81.6%~93.6%，且随着桩顶荷载的增加，桩端阻力所占比例快速增长。根据极限承载力外推值，桩侧、桩端压浆的极限承载力提高幅度为 89.85%~147.81%，桩端压浆的极限承载力提高幅度为 30.08%~81.78%。根据软土中应用后压

浆技术的钻孔灌注桩的静载荷试验及桩身应力测试结果^[40]，考虑到土体的连续性引起的变形，对各桩段实测的摩阻力与位移关系进行了修正，并用传递函数对摩阻力与位移关系进行了拟合，得出各桩段的摩阻力极限值，从而真实反映出压浆后摩阻力沿桩身的分布规律。结合大直径超长桩试桩得到的试验资料，应用有限元方法分析了压浆对大直径超长钻孔灌注桩承载性能的影响。根据反分析计算结果可知^[41]，桩周摩阻力、桩端加固体变形模量及桩周土的变形模量均有不同程度的提高，桩周土在整个桩长范围内变形模量提高幅度为 33%~67%，平均侧摩阻力提高幅度为 30%~40%，与实测结果基本一致。

戴国亮等^[42]通过对一根超长灌注桩桩端后压浆自平衡静载试验以及钻孔取芯试验得出，超长钻孔灌注桩桩端后压浆水泥浆液上返高度在该地质条件下达 15m 左右，但水泥浆液在地下需要较长时间才能达到设计强度，且分布不均。桩周土层标贯试验表明，贯入击数与压浆前相比，普遍提高。

胡春林等^[43]基于 72 个工地 186 根静载试桩的统计资料，分析了桩端、桩侧压浆对钻孔灌注桩的增强加固机理，深入研究了后压浆钻孔灌注桩单桩竖向承载力特性。利用静载试桩结果，统计出后压浆桩极限承载力增幅值及极限端阻力增强系数的频数分布规律，提出了后压浆桩单桩极限承载力的实用计算公式。

何剑^[44]对桩底注浆和没有注浆的两根试桩的单桩竖向抗压静载荷试验结果对比分析得出，桩底后压浆注浆技术对提高泥浆护壁钻孔灌注桩的承载力是有效的。通过桩底后压浆，充分加强了桩与土之间相互作用的有利方面，使桩-土体系更加紧密地形成一个协同工作的系统，改善了基桩的承载性状，桩顶沉降明显减小。

张忠苗等^[45]系统阐述了持力层为砾石层的钻孔灌注桩的桩底后注浆机理和工艺，并结合工程实际分析了注浆压力、浆液浓度、注浆量、注浆半径和注浆效果。研究得出，对桩底注浆工艺和参数的确定，要针对不同的土质条件有针对性地进行，在保证桩底混凝土不破坏和桩不上抬前提下，实行桩底注浆量和注浆压力双控，并首先保证桩底合理的注浆量。桩底注浆预埋管要埋两根且应在水下混凝土达初凝强度后进行开塞、注浆，浆液水灰比常为 (0.4~0.7) : 1，先稀后浓，掺入少量减水剂和膨胀剂。

(6) 长短组合桩

在实际工程设计和分析中经常会遇到地基土存在两层或多层可作为桩端持力层的情况，如图 1-5 (a) 所示，其浅层持力层承载力良好且埋深不大，但存在的问题是短桩基础可基本满足承载力要求但沉降量过大。杨敏等^[46-48]学者按照长桩主要控制变形，短桩主要提供承载力的基本思路，长短桩组合桩基础中长桩穿过浅层持力层及其软下卧层，落在压缩性较小的深层持力层上，利用长桩将荷载传至地基深处，达到控制沉降的目的，长桩在基础中除承担部分荷载外主要起减少和控制沉降的作用。由于控制沉降所需长桩数远小于常规全长桩基础中的长桩数，因此，为达到与常规全长桩基础相同的承载力安全度，由于长桩数量减少而引起的承载力不足部分应由相应数量的短桩提供，短桩支承在浅层持力层，如图 1-5 (b) 所示。同时，不考虑承台自身地基承载力，而将其作为基础的整体安全储备。这样，相对于传统的基于强度控制理论设计的全长桩基础而言，长短桩组合桩基础充分利用和发挥了长桩控制沉降的能力与地基土浅层持力层的承载能力。与常规设计方法相比，长短桩基础减少了长桩数量，使施工难度和工程造价降低。三维弹塑性有限元分析得出，长短桩基础调节差异沉降的能力强于短桩基础和全长桩基础。长桩的存在，不仅

影响了总沉降，也影响了沉降分布规律，使基础受力更加均匀；长短桩组合桩基础的沉降由长桩控制，短桩数量增加对整体沉降影响不大；短桩提供承载力，短桩的存在，减少了长桩桩顶所承担的荷载；长桩持力层模量增加使长桩分担荷载比例增加，短桩分担荷载比例减少。

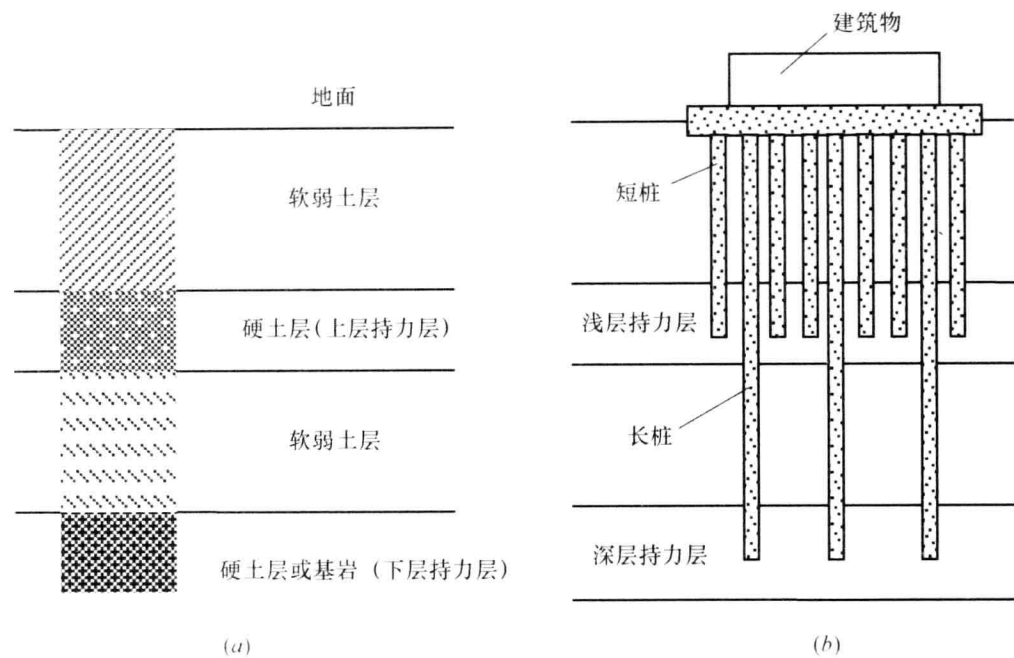


图 1-5 长短桩组合桩适于土层及设计示意图
(a) 适于长短桩基础的土层分布示意图；(b) 长短桩组合桩基础示意图

朱小军等^[49]在室内模型试验的基础上，对长短桩组合桩基础的荷载与沉降的关系、桩身侧摩阻力分布、桩身应力以及长短桩组合桩基础中长桩和短桩承载性状发挥状况等问题进行了分析，得出了一些规律性的、有价值的结论。

王伟等^[50]采用三维弹塑性有限元方法对全短桩、全长桩、长短桩复合地基和长短桩桩基础进行了对比分析，得出长短桩桩基础的平均沉降小于全短桩基础和长短桩复合地基，但仍大于全长桩基础；长短桩桩基础中长桩的中性点位置比长短桩复合地基的要深一些，受到的负摩阻力稍大些；长短桩桩基础中短桩作用发挥要比长短桩复合地基的短桩充分，而且其长桩的最大桩身轴力相比也小。

刚柔性长短桩复合地基^[51-53]是近几年被工程界广泛应用的一种较新的地基处理形式，它一般有刚性长桩与柔性短桩复合而成。长桩一般选用混凝土桩，模量较大，也叫刚性桩；短桩常用水泥土搅拌桩等，模量较小，也叫柔性桩；故长短桩复合地基也称刚柔复合桩基。刚性桩可以减少基础的沉降、提高基础的承载力及作为承载力的安全储备，柔性桩则主要用来提高基础的承载力，这样刚柔性桩相结合对地基的综合处理，可以发挥其各自特点，并在确保地基处理效果的前提下达到方案合理、节约投资、缩短工期等目的。

陈龙珠等^[54]在杭州某采用带褥垫层刚柔性复合地基的七层住宅楼基底埋设压力盒进行现场观察，实测数据表明，在垫层的作用下，桩土荷载分担在加载初期的弹性阶段近似按各自的相对刚度分配，随着上部荷载的增加，浅层地基土和柔性桩逐渐进入非线性状态，新增荷载主要由刚性桩来承担。对采用带垫层的长-短桩复合地基的一栋 14 层小高层建筑^[55]，在建造和使用过程中观测了长桩、短桩和地基土的受力状况以及基础沉降的变