

由河南省科技著作项目资助出版

再生混凝土 劲性搅拌桩 试验与应用技术研究

ZAISHENG HUNNINGTU
JINXING JIAOBANZHUANG
SHIYAN YU
YINGYONG JISHU YANJIU

岳建伟 刘凤利◎著

中原出版传媒集团
大地传媒

 河南科学技术出版社

再生混凝土劲性搅拌桩 试验与应用技术研究

岳建伟 刘凤利 著

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

再生混凝土劲性搅拌桩试验与应用技术研究/岳建伟等著. —郑州:
河南科学技术出版社, 2015. 9
ISBN 978-7-5349-7859-3

I. ①再… II. ①岳… III. ①再生混凝土-水泥搅拌桩-复合桩
基-研究 IV. ①TU473. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 212300 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65737028

网址: www.hnstp.cn

策划编辑: 王向阳

责任编辑: 孟明明

责任校对: 柯 姣

封面设计: 张 伟

责任印制: 张艳芳

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 13.25 字数: 306 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

前 言

随着地基处理技术的不断发展，在实践工程中不断涌现出新型复合地基形式，劲性搅拌桩复合地基就是其中的一种地基处理方式。劲性搅拌桩复合地基根据传统预制桩和水泥搅拌桩的承载力机制和施工特点，充分发挥预制桩和水泥土各自材料性能，具有降低工程造价、施工方便、有利于保证质量的优点。

劲性搅拌桩复合地基近年来在软基地区地基处理中有所应用，并积累了一定的工程实践经验，但至今人们对劲性搅拌桩复合地基荷载传递机制的认识还处于初级阶段。本书通过对劲性搅拌桩复合地基特性的系统研究，使这种地基处理形式达到理论上的成熟和技术上的完善，并大面积推广应用，以取得良好的经济效益和社会效益。

本书从试验分析、数值分析和理论分析三条途径研究了劲性搅拌桩复合地基的特性，提出了较成熟的设计施工方法。劲性搅拌桩复合地基的核心问题有三个：承载力问题、变形问题、桩土共同作用问题。本书是围绕着这三个问题展开的，实质上承载力和变形问题是检验任何地基处理方式是否可行的依据，它决定了地基处理的成败。而桩土共同作用问题是统领劲性搅拌桩复合地基技术问题的灵魂，如何保证在荷载作用下通过预制桩芯桩、水泥搅拌桩和桩间土变形协调来保证芯桩、水泥土和桩间土共同承担荷载是检验劲性搅拌桩复合地基技术是否合理的关键。

本书由河南大学岳建伟、刘凤利等共同撰写，具体分工为：岳建伟撰写第1章，刘凤利撰写第2、3、12章，徐安全撰写第4、7章，陈艳敏撰写第5、11章，王永峰撰写第6、13章，盛桂琳撰写第8、10章，岳婷婷撰写第9章。

可以期望，随着劲性搅拌桩复合地基技术的完善，人们对劲性搅拌桩复合地基荷载传递机制的认识还会继续深入，本书希望在推动劲性搅拌桩复合地基理论发展方面起到抛砖引玉的作用。由于作者水平有限，书中可能存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2014年12月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 水泥土的发展概况	(1)
1.1.1 国外水泥土的发展概况	(1)
1.1.2 国内水泥土的发展概况	(2)
1.2 水泥土搅拌桩的发展概况及不足	(2)
1.2.1 水泥土搅拌桩的发展概况	(2)
1.2.2 水泥土搅拌桩存在的不足	(3)
1.3 劲性水泥土搅拌桩的发展概况	(4)
1.3.1 国外劲性水泥土搅拌桩的发展概况	(4)
1.3.2 国内劲性水泥土搅拌桩的发展概况	(4)
1.3.3 劲性水泥土搅拌桩存在的不足	(6)
1.4 再生混凝土研究概况	(6)
1.4.1 再生骨料的研究意义	(6)
1.4.2 再生骨料的研究现状	(7)
1.4.3 再生混凝土性能的研究现状	(10)
1.4.4 陶瓷再生混凝土的研究现状	(11)
1.4.5 再生混凝土应用概况	(13)
1.5 主要研究内容	(14)
1.5.1 问题的提出	(14)
1.5.2 主要研究内容	(15)
第 2 章 黄泛区地质的特点	(16)
2.1 黄泛区概述	(16)
2.2 黄泛区粉土的分类	(16)
2.3 黄泛区粉土的物质组成特点	(17)
2.3.1 土壤中的盐分	(17)
2.3.2 粒度成分特征	(18)
2.3.3 化学成分	(18)
2.3.4 矿物组成	(18)
2.4 黄泛区粉土的物理性质	(19)

2.5	黄泛区软土地基常见的处理方法	(23)
2.5.1	强夯法	(23)
2.5.2	排水固结法	(24)
2.5.3	水泥土搅拌桩法	(24)
2.5.4	振动碎石桩法	(24)
2.5.5	石灰桩法	(25)
2.5.6	真空堆载联合预压法	(25)
2.5.7	置换法	(25)
第3章	陶瓷再生骨料混凝土基本性能的试验研究	(26)
3.1	试验材料	(26)
3.1.1	胶凝材料和掺合料	(26)
3.1.2	细骨料	(26)
3.1.3	粗骨料	(29)
3.2	陶瓷再生沙对陶瓷再生骨料混凝土性能的影响	(30)
3.2.1	对陶瓷再生骨料混凝土拌和物表观密度和坍落度的影响	(30)
3.2.2	对陶瓷再生骨料混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响	(31)
3.3	水灰比对陶瓷再生骨料混凝土抗压强度的影响	(33)
3.4	废陶瓷再生混合沙混凝土与普通混凝土性能对比研究	(35)
3.4.1	试验材料	(35)
3.4.2	试验详情	(36)
3.4.3	对再生混凝土拌和物表观密度的影响	(36)
3.4.4	对再生混凝土拌和物和易性的影响	(36)
3.4.5	对再生混凝土抗压强度的影响	(37)
3.4.6	对再生混凝土劈裂抗拉强度的影响	(38)
3.4.7	对再生混凝土脆性的影响	(38)
第4章	劲性搅拌桩的材料特性及强度影响因素	(39)
4.1	劲性搅拌桩桩身物理力学特性	(40)
4.1.1	内芯的物理力学特性	(40)
4.1.2	水泥土外芯的物理力学特性	(40)
4.2	劲性搅拌桩的综合材料特性	(41)
4.3	劲性搅拌桩桩身材料强度影响因素	(41)
4.4	适用范围	(43)
第5章	水泥土室内试验研究	(45)
5.1	试验材料	(45)
5.1.1	试验所用土样	(45)
5.1.2	试验所用水泥	(45)
5.1.3	试验所用外加剂及其他	(46)
5.2	试验方案	(46)

5.2.1	试验方案依据	(46)
5.2.2	试验方案制订	(48)
5.3	试块的制备与养护	(48)
5.3.1	试块的制备	(48)
5.3.2	试块的养护	(50)
5.4	试验内容	(50)
5.5	试验结果	(52)
5.6	试验结果分析	(53)
5.6.1	普通水泥土无侧限抗压强度	(53)
5.6.2	掺粉煤灰水泥土无侧限抗压强度	(54)
5.6.3	掺沙水泥土无侧限抗压强度	(56)
5.6.4	掺灰钙水泥土无侧限抗压强度	(57)
5.6.5	不同养护方式下水泥土无侧限抗压强度	(58)
5.6.6	水泥土的变形特性	(60)
第6章	改性劲性搅拌桩室内试验	(64)
6.1	概述	(64)
6.2	模型试验的设计	(64)
6.3	试验模型的制作	(65)
6.3.1	水泥土搅拌机模型	(65)
6.3.2	芯桩模型制作	(66)
6.3.3	整体模型箱制作	(68)
6.4	模型试验加载测试装置	(70)
6.4.1	试验加载装置	(70)
6.4.2	试验测试装置	(72)
6.5	试验过程	(73)
6.5.1	单桩承载力预估	(73)
6.5.2	试验的加载	(75)
6.6	试验结果与分析	(75)
第7章	劲性搅拌桩的现场试验研究	(84)
7.1	试验的主要目的和内容	(84)
7.2	试验场地工程地质概况	(85)
7.3	室内土工试验统计表	(86)
7.3.1	各层粉土的黏粒含量统计	(86)
7.3.2	三轴剪切试验(UU)成果统计	(86)
7.3.3	渗透试验成果统计	(87)
7.3.4	高压固结试验成果统计	(87)
7.4	原位测试成果统计	(87)
7.4.1	静力触探测试成果统计	(87)

7.4.2	标准贯入试验成果统计	(88)
7.5	试桩的设计	(89)
7.6	试桩的制作和测点的布置	(90)
7.7	试验的加载设计	(92)
7.8	试验检测方法原理及设备	(93)
7.8.1	试验原理	(93)
7.8.2	试验依据	(93)
7.8.3	加载装置	(94)
7.8.4	仪表选择与布置	(94)
7.8.5	加载制度	(94)
7.8.6	试验主要仪器	(95)
7.9	材料性能试验	(95)
7.10	劲性搅拌桩的竖向荷载试验	(95)
7.10.1	劲性搅拌桩的竖向荷载与沉降	(95)
7.10.2	试验桩极限承载力的确定	(101)
7.10.3	劲性搅拌桩的桩身轴力及单位侧摩阻力的分布	(102)
7.10.4	劲性搅拌桩的试验结果分析	(106)
7.11	劲性搅拌桩的水平荷载试验	(109)
7.11.1	单桩水平临界荷载的确定原则	(109)
7.11.2	单桩水平极限荷载的确定原则	(109)
7.11.3	三根试桩的试验结果、 $H-t-Y_0$ 曲线及 $H_0 - \frac{\Delta Y_0}{\Delta H_0}$ 曲线	(110)
7.12	三根试桩破坏模式分析	(113)
7.13	桩身内力的分析	(115)
7.13.1	单桩水平荷载作用下桩身弯矩的推算	(115)
7.13.2	地基土水平抗力系数的比例系数 m 的确定	(116)
7.13.3	水平承载力设计值估算计算公式的提出	(121)
第8章	劲性搅拌桩圆柱孔扩张问题的理论解答	(122)
8.1	圆柱孔扩张问题弹性阶段应力及位移解答	(122)
8.2	圆柱孔扩张问题的塑性解答	(125)
8.2.1	Tresca 材料圆柱孔扩张问题的解答	(125)
8.2.2	Tresca 材料圆柱孔扩张问题的实例求解	(127)
8.3	桩引起的超孔隙水压力计算	(129)
第9章	试验桩的有限元分析	(131)
9.1	有限元原理简介	(131)
9.1.1	有限元法的基本思想	(131)
9.1.2	有限元法的基本步骤	(131)
9.1.3	数值计算与试验分析的对比	(132)

9.2	有限元软件 ABAQUS 简介	(132)
9.2.1	ABAQUS 概述	(132)
9.2.2	ABAQUS 在岩土工程中的实用性	(132)
9.3	模型的建立	(133)
9.3.1	模型简化	(133)
9.3.2	建模过程	(133)
9.4	模型桩有限元分析结果	(135)
9.5	桩水平承载力数值分析	(137)
9.5.1	桩的侧向工作特性分析	(139)
9.5.2	芯桩对桩体侧向工作特性的影响	(141)
第 10 章	劲性搅拌桩复合地基竖向荷载下的性状研究	(144)
10.1	劲性搅拌桩竖向荷载分配与传递机制	(144)
10.2	计算模型及计算参数的选取	(144)
10.2.1	计算模型	(144)
10.2.2	计算参数的选取	(145)
10.3	计算结果分析	(146)
10.3.1	劲性搅拌桩复合地基的单桩承载力	(146)
10.3.2	劲性搅拌桩承载力提高机制	(148)
10.3.3	复合地基的沉降	(148)
10.3.4	劲性搅拌桩桩体位移	(151)
10.3.5	劲性搅拌桩桩体轴向应力	(152)
10.3.6	劲性搅拌桩桩顶应力	(153)
10.3.7	劲性搅拌桩桩体内外芯桩荷载分担比	(155)
10.3.8	劲性搅拌桩桩体桩土荷载分担比	(156)
10.3.9	劲性搅拌桩桩体侧摩阻力	(157)
10.4	劲性桩复合地基的应用	(159)
10.4.1	劲性桩复合地基承载力计算	(159)
10.4.2	劲性桩复合地基沉降计算	(160)
第 11 章	劲性搅拌桩复合地基水平荷载性状分析	(162)
11.1	单桩水平振动问题研究现状	(162)
11.1.1	连续介质解析理论	(163)
11.1.2	文克尔地基梁模型法	(163)
11.1.3	有限元和边界元理论	(164)
11.2	分析模型及方法	(165)
11.2.1	土体本构关系及单元类型	(165)
11.2.2	阻尼矩阵的确定	(165)
11.2.3	传输边界	(166)
11.2.4	时域分析的动力方程及求解方法	(167)

11.2.5	基本假定及分析模型	(167)
11.3	计算参数及地震波输入	(168)
11.4	复合地基的地震响应分析	(169)
11.4.1	劲性搅拌桩复合地基与桩基础的比较	(169)
11.4.2	复合地基不同波形的比较	(170)
11.4.3	复合地基不同芯桩长度的比较	(173)
11.4.4	复合地基不同截面含芯率的比较	(174)
11.4.5	复合地基不同水泥土模量的比较	(176)
11.4.6	不同波形上部结构水平位移的比较	(178)
11.5	水平荷载静力分析	(179)
11.6	动力群桩效应分析	(180)
11.6.1	群桩相互作用分析方法	(180)
11.6.2	群桩完全动力分析	(183)
11.6.3	群桩动力阻抗	(184)
第12章	劲性搅拌桩的若干问题及其优化设计	(186)
12.1	劲性搅拌桩的若干问题	(186)
12.1.1	水泥土搅拌桩的水泥掺入量问题	(186)
12.1.2	水泥土搅拌桩的搅拌均匀性问题	(186)
12.1.3	水泥土的空气增强效应	(187)
12.1.4	劲性搅拌桩施工机具问题	(187)
12.1.5	劲性搅拌桩施工时注意的问题	(188)
12.2	劲性搅拌桩的破坏模式	(188)
12.2.1	芯桩桩顶被压碎	(188)
12.2.2	芯桩向水泥土中刺入	(189)
12.2.3	劲性搅拌桩无芯段被压碎	(189)
12.2.4	劲性搅拌桩整桩向桩端土中刺入	(189)
12.3	劲性搅拌桩的优化设计	(189)
12.3.1	劲性搅拌桩内外芯长比设计	(189)
12.3.2	劲性搅拌桩芯桩截面尺寸设计	(190)
12.3.3	劲性搅拌桩桩身掺灰量设计	(191)
第13章	劲性搅拌桩设计与施工技术	(193)
13.1	适用条件 and 设计原则	(193)
13.1.1	适用条件	(193)
13.1.2	设计原则	(193)
13.2	设计方法	(193)
13.2.1	一般规定	(193)
13.2.2	构造	(194)
13.2.3	计算方法	(194)

13.3 施工技术 (195)

 13.3.1 施工准备 (195)

 13.3.2 施工作业 (196)

13.4 质量检测 (197)

13.5 承载力检测 (197)

13.6 工程验收 (198)

参考文献 (199)

第 1 章 绪 论

1.1 水泥土的发展概况

1.1.1 国外水泥土的发展概况

从 20 世纪初期国外就开始了对水泥土的研究和应用,1915 年美国佛罗里达州一位修路的承包商,在修筑奥克街的一段时,是用犁将从海湾挖出的贝壳、沙子和水泥混合在一起搅拌,再经蒸汽压路机将表面压实而成,这很有可能是世界上首次应用水泥土的实例。

20 世纪 30 年代,美国已将水泥土使用在铺筑公路、铁路路基、机场跑道等方面。20 世纪 40 年代,美国材料试验协会编订了水泥土试验标准。1945 年美国第一次将水泥土应用在大型蓄水池底部的防渗工程中,该蓄水池使用 20 多年未发现渗漏现象。20 世纪 50 年代早期,美国将水泥土用作邦奈水库土坝的边坡防护材料,10 年以后对现场进行取样,测定其力学性能,试样强度比 28d 龄期时的强度翻了一番。

19 世纪 60 年代,日本开始引进水泥土施工方法。80 年代初期,由日本多家机构合作开发研制了水泥搅拌固化法(CMC),用于加固软土地基。接着日本各大施工企业接连开发出施工机械规格和施工效率各异的深层搅拌机械,形成多种工法。除美国、日本外,其他许多国家也都有应用。

Glen A. Lorenzo 等通过测定加固后水泥土的孔隙比,得到水泥土的压缩变形特性与水泥掺量之间的关系。

Mostafa A. Ismail 等用不同类型的水泥制作水泥土,通过三轴试验测定其抗剪强度,从而研究不同类型的水泥对水泥土抗剪强度的影响。

Fook-HouLee 等提出应同时控制水灰比和土灰比,通过二者来共同反映固化土的强度和变形模量。

G. M. Filz 等为了考虑原土中已经含有的水分,提出了总水灰比的概念,通过控制总水灰比来研究水泥土的强度。

Gerald A. Miller 得到被加固土的塑性指数、含水量与水泥土的抗压强度之间的关系。

Shenbaga R. Kaniraj 等在水泥土中添加粉煤灰研究其力学性能,得到了粉煤灰和水泥掺量之间的相关性。

D. T. Eriktius 等研究了淤泥质水泥土,他们发现随着水泥掺量的增多,水泥土的抗压强度和抗剪强度有较大的提高。

1.1.2 国内水泥土的发展概况

我国水泥土的发展较国外晚一些,从20世纪70年代前期开始在水利工程中研究和应用水泥土。此后,水泥土开始逐渐被应用于护坡、防渗等方面。20世纪70年代中后期,国内部分科研单位开始对水泥土的应用展开系统的研究工作。

1974年辽宁省在沈—抚南线公路上铺筑了20km水泥土作为沥青路面的基层,这是我国公路上第一例大规模应用水泥土。根据我国的国情,我们将水泥土用于强度要求不高、建筑物体积较大的土建工程中,而且还将这种强度较低的水泥土用于对承受水压、活载、冲刷等强度要求不高、尺寸较薄的水工建筑物上。20世纪80年代后期,交通部水运规划设计院在试验室内对深层搅拌法和施工机械进行了研究。20世纪80年代以后,水泥土开始大量应用在工程中,例如将水泥土用于荆江大堤的边坡护坡;在红领巾水库灌区将水泥土用作渠道的防渗;用水泥土处理深圳宝安德松白公路的路基;水泥土搅拌桩作为围护结构在静安寺下沉广场围护工程和轻轨宝兴路站承台围护工程中的应用等。1999年,南京金陵石化公司炼油厂油罐下的软土地基采用超长水泥土搅拌桩进行地基加固,事实证明,采用该方法非常成功,加固后地基沉降量仅为20cm左右,这是国内首次采用超长水泥搅拌桩加固软基并获得成功的例子。

近些年水泥土搅拌桩机械也有了很大发展,以前只有单轴搅拌机和固定双轴搅拌机,现在已研制出了可变距双轴搅拌机,搅拌桩的深度和直径都在增大,大型的高压喷浆设备也在不断出现。

近些年不少学者从不同的方面对水泥土的性质进行了研究。

储诚富等研究了水泥掺量、含水量、龄期对水泥土强度的影响,得到了强度预测公式;王景华从微观的角度研究了水泥土的固化过程;高国瑞等从宏观的角度分析水泥对土体的固化机制;宁宝宽等从水泥土在外界侵蚀作用下的力学性能出发,做了相关的损伤试验;焦志斌等对酸性的淤泥质土进行了水泥掺入比试验,相同掺入比的不同土质水泥土的强度变化很大;张登良等认为水泥水化后在土的空隙中形成骨架,由于水泥掺量较少,水泥被土包围,水泥的水化反应受土的影响很大。

郑刚在试验室内做了三根水泥土的缩尺寸模型,由试验结果可知,水泥搅拌桩的侧摩阻力要高于普通混凝土桩,由于水泥土强度不足限制了侧摩阻力的发挥。段继伟等认为当水泥搅拌桩承受极限荷载时,桩顶处的水泥土被压碎,桩的侧摩阻力得不到有效利用,水泥土搅拌桩存在有效桩长。

1.2 水泥土搅拌桩的发展概况及不足

1.2.1 水泥土搅拌桩的发展概况

水泥土搅拌法是用于软土地基加固的一种常见的方法。它是利用水泥作为固化剂,通过特制的深层搅拌机械,边转边往软土中喷射浆液或雾状粉体,在地基深处就地软土固化成为具有足够的强度、变形模量和稳定性的水泥土,从而达到地基加固的目的。这种由水泥与软土搅拌形成的固结体在我国统称为水泥土搅拌桩。

水泥土搅拌桩的发展可追溯到 1824 年英国人阿斯皮琴制造出硅酸盐水泥并取得了专利,利用水泥灌浆止水,利用水泥和土拌和作为土木工程材料在工程中得到了应用,但主要是作为浅层处理。由于历史原因和使用习惯,将用水泥浆与软土搅拌形成的柱状固结体称为浆喷桩,又称湿法搅拌桩;将用水泥粉体与软土搅拌形成的柱状固结体称为粉体喷射搅拌桩,简称粉喷桩,又称干法搅拌桩。

水泥浆搅拌法最早在美国研制成功。美国在第二次世界大战后曾研制开发成功一种就地搅拌桩,以处理深部软土,即从不断回转的、中空轴的端部向周围已被搅松的土中喷出水泥浆,经翼片的搅拌而形成水泥土桩。在日本,此种方法被称为 CDM 工作法,1974 年日本进行 CDM 工作法的研究开发工作,1975 年起就投入使用。目前,日本有海上和陆上两种施工机械,陆上的机械为双轴,成孔直径为 1 000mm,最大钻深为 40m;海上的施工机械有多种类型,成孔的最大直径为 1 000mm,最多的轴有 8 根,即一次成孔 8 个,最大钻孔深度为 70m。

国内 1977 年由建筑研究总院和交通部水运规划设计院进行了室内试验和机械研制工作,于 1978 年年底制造出国内第一台双搅拌轴中心管输浆的搅拌机械,并由江阴市江阴阻振冲器厂成批生产,在上海宝钢三座卷管设备基础的软土地基加固工程中首次获得成功。1980 年年初,天津市机械施工公司与交通部第一航务工程局科研所利用日本进口螺旋钻孔机械进行改装,制成单搅拌轴和叶片输浆型搅拌机,并在 1981 年成功用于天津造纸厂蒸煮锅改造工程中。上海探矿机械厂于 1994 年生产出双轴深层搅拌机,加固深度为 18m,成孔直径为 700mm。

1999 年南京金陵石化公司炼油厂采用了单头直径 700mm、长 17~27m 的超长水泥土搅拌桩进行地基加固,每台油罐下布置桩 300 多根。施工机械是由深层搅拌机改制而成。结果表明,加固后的复合地基承载力是原天然地基的 3.5 倍,满足了设计的要求。

2002 年上海探矿机械厂为配合土壤水泥墙工法——SMW 工法而研究生产出两种三轴钻孔搅拌机,钻孔深度达 30m,钻孔直径 650~850mm。目前上海隧道工程股份有限公司为提高国产深层搅拌机的成墙深度、成墙质量和施工效率,研究开发了四轴深层搅拌机,搅拌成孔的直径为 700mm,钻进成孔深度 25.2m,型钢插入深度 24m,成墙厚度达 1.26m。

1997 年由上海申元岩土工程有限公司和上海航天局 809 研究所联合研制出的“施工监控自动化一型水泥搅拌桩注浆量检测记录仪”得到广泛的采用。它不仅是施工时测定水泥浆量的一种装置,而且可以控制并记录水泥浆量在桩身范围内分布的均匀程度,有效地解决了水泥土搅拌桩施工质量失控的难题,使施工质量得到可靠保证。

1.2.2 水泥土搅拌桩存在的不足

采用常规水泥土桩无论是深层搅拌桩型还是粉喷桩型,都存在以下不足:一是水泥和土体混合得不够均匀,多方面原因造成有些地方水泥含量高,有些地方水泥含量低;二是由于地基土的分层性,在一些薄弱土层,由于土质较差,所以该段水泥土强度较低,从而整根桩的强度都受这一段影响;桩身强度低,必然限制了其单桩承载力

的提高。

对于第一种不足,需改进机械。对于第二种不足,则需要研究不同种类土质的性质,而且对于特定的土质要研究提高其强度的方法。

1.3 劲性水泥土搅拌桩的发展概况

1.3.1 国外劲性水泥土搅拌桩的发展概况

1976年日本发明了一种新的地下连续墙做法——SMW工法。它是在水泥土混合体凝结之前插入刚度较大的型钢,让型钢承受主要荷载,从而形成刚度较大的地下连续墙。该法在英国、美国、法国等许多国家都有广泛应用,我国的台湾、香港地区也较早使用了该方法。

20世纪90年代,日本研发了一种新桩型——肋型钢管水泥土桩。该种桩具有较大的侧表面积和高承载力的芯桩,并且肋型钢管和水泥土沉降量几乎一样,整体性良好。1997年,日本一家公司将钢管换成混凝土芯桩,并申报了相关的专利技术,还要求在遇到有薄弱土层时,对桩端进行扩颈或注浆搅拌处理。日本合成钢管桩工法协会总结前人经验,自己也做了大量试验,最终研发了先进的HYSC工法。

近年来在欧美等地比较常见的劲性搅拌桩是Pin Pile桩,它是在钻孔灌注桩中插入钢管或钢棒制成,其主要用于对现存建筑物的加固和改造。

1.3.2 国内劲性水泥土搅拌桩的发展概况

20世纪90年代国内开始研制开发砼芯水泥土桩,河北省沧州市机械施工有限公司将预制空心钢筋砼电杆插入水泥搅拌桩桩体内形成一种新的桩,并对这种桩进行静载试验。试验表明,这种新的劲性搅拌桩的单桩极限承载力达到了普通水泥搅拌桩的3倍,他们为这种桩申报了专利,这种桩就是国内劲性搅拌桩的雏形。

1998年开始,天津大学、河北工业大学相继和沧州市机械施工有限公司进行合作,做了大量砼芯水泥土桩的相关现场和模型试验,对其进行了系统的研究。并将这种桩应用到试点工程中。在试验和实践的基础上,颁布了砼芯水泥土桩工法的地方标准。

与此同时,国内其他地方和单位也对类似的劲性搅拌桩展开了试验研究和应用推广。1998年,上海和南京的多项工程应用了上海多个单位联合研发的砼芯水泥土复合桩(劲性搅拌桩),相对普通桩筏基础,造价明显降低,取得了相当不错的效果;2001年,中科院对复合灌注桩在水下工程的应用进行了相关试验研究;同年,为了研究劲性搅拌桩的受力机制,昆明理工大学在附近的谷堆村制作了6根模型桩,进行了“劲性搅拌桩”的现场试验;河北省建筑科学研究院等单位在2003年将其研发的“刚性芯复合桩”应用到了实际工程中。

劲性搅拌桩中,水泥土和芯桩之间通过较大的侧摩阻力共同工作,从而将上部荷载有效地传递给地基土。因此研究芯桩与水泥土接触面上黏结力是劲性水泥土搅拌桩重点之一。

孙全德为了对水泥土与螺纹钢管的整体黏结性能进行研究,对两面有螺纹的钢板

进行拉拔试验,表明芯桩与水泥土之间黏结强度与水泥土无侧限抗压强度之间存在近似关系。

邹宗煊测定了水泥土对砼芯的握裹力,表明单位面积提供的最大黏结力(侧摩阻力极限值)与水泥土强度呈近似的线性关系,各试件的黏结系数平均值为0.133。

凌光容对劲性水泥土搅拌桩进行了研究,他认为如果水泥掺量合适且芯桩与之相匹配,那么可以以较低的成本获得与同比混凝土桩更高的极限承载力;增加芯桩长度和提高截面含芯率均可提高劲性搅拌桩的承载力,但超过一定值对承载力的影响将不再明显。

董平等的研究表明劲性水泥土桩工作特性与单桩相似,传递到桩端的荷载不超过总荷载的7%,其工作方式为纯摩擦桩;各试验桩的 $Q-S$ (应力应变)曲线都存在明显陡降直线拐点,呈现两种破坏模式:渐进型破坏和急进型破坏。

胡志成以广东鹤山市一实际工程为依据,详细介绍了该工程中劲性搅拌桩的施工顺序和技术要求,以及如何进行质量控制,为其他单位进行该种桩的施工提供了依据;通过对桩基检测和建筑物的沉降观测,证明劲性搅拌桩稳定可靠,与沉管灌注桩相比造价降低接近一半,经济效益十分明显。

陈颖辉等在昆明黄土坡谷堆村进行了劲性搅拌桩的静载试验,研究表明劲性水泥土桩具有承载力可调的特点;他分析了该种桩的荷载传递机制及桩的破坏形态,指出了两种破坏形式的影响因素,并对芯桩进行了优化设计。

李正等的研究表明劲性水泥土桩承载力是同比水泥土桩的1.8~2.2倍,承载力提高幅度随芯桩长度和横截面的增大而增大;水泥土桩 $Q-S$ 曲线出现陡降段而砼芯水泥土桩 $Q-S$ 曲线大多无陡降段出现。

吴迈等通过室内室外模型试验研究了劲性搅拌桩侧摩阻力的相关性能及芯桩和水泥土之间的侧摩阻力和黏结关系。研究结果表明,混凝土芯桩和水泥土环桩能很好地共同工作。

丁永军等在天津市郭村进行了三根足尺寸劲性搅拌桩的模型试验,试验结果显示,劲性搅拌桩的单桩承载力和预制混凝土桩接近,但小于钻孔灌注桩。劲性搅拌桩的侧摩阻力与规范推荐的预制桩摩阻力之比一般为1.29~3.9。他还提出了劲性搅拌桩单桩承载力经验公式。

岳建伟等分析了劲性搅拌桩高承载力的主要原因,第一是水泥的固化效应,水泥浆和土不但形成了水泥土,由于高压喷浆,还会在桩土界面形成过渡带,这能提高界面的抗剪强度;第二是挤土效应,插入砼芯会向外挤压水泥土桩,使桩侧土体密实,强度增大;第三是高弹性模量的砼芯,减小了桩身压缩量。

孔庆梅对砼芯搅拌桩进行了有限元分析,分析表明,单桩的沉降主要受持力层模量的影响,改变芯桩的直径和桩长能明显影响单桩的沉降、桩身的轴力和侧摩阻力的分布。对比砼芯水泥土桩和普通灌注桩,二者的极限承载力接近。

孔德志、张庆贺通过理论分析和有限元模拟并对比他人试验得出,水泥土搅拌桩加入砼芯后,上部侧摩阻力明显减小,下部的摩阻力增大,提高了整个桩身侧摩阻力的利用率,对于较长的桩,加芯可以提高其有效桩长。

鲍鹏等通过有限元模拟对劲性搅拌桩复合地基的动力效应进行分析,研究表明在地震作用下,在距桩顶 $0.2\sim 0.4L$ (L 表示桩身全长) 处出现最大弯矩,截面含芯率对桩身剪力和弯矩影响最大,其次是芯桩长度。

1.3.3 劲性水泥土搅拌桩存在的不足

劲性水泥土搅拌桩的破坏模式主要有四种: 砼芯桩桩头被压碎; 砼芯桩下端刺入水泥土中; 劲性水泥土搅拌桩的下部纯水泥土搅拌桩的部分被压碎; 劲性水泥土搅拌桩整桩向桩端持力层中刺入。

其中第一种破坏模式是由于芯桩强度不足造成的,需增加芯桩混凝土强度; 第二、三种破坏模式是由于水泥土强度太低引起的,需提高水泥土的强度; 第四种破坏模式是由于无芯段长度不足所致,增加无芯段桩长即可。

1.4 再生混凝土研究概况

1.4.1 再生骨料的研究意义

混凝土是由胶凝材料、水和粗、细骨料按适当比例配合,经硬化而成的人造石材。砂浆可认为是不含粗骨料的混凝土。砂浆、混凝土已成为世界上用量最大的建筑材料,但随着混凝土用量的增加,其消耗的沙石骨料等天然资源也越来越多。据估算,混凝土业现在正以每年约 50 亿 t 的速度消耗天然骨料,沙石已成为其中用量最大的原材料。大量开山、采石已经严重破坏了自然山体的景观和绿色植被。挖河床取沙改变了河床位置及形状,造成水土流失或河流改道等严重后果,对地球的生态环境影响很大。许多国家和地区甚至已经没有可取的碎石和沙子,骨料资源出现了严重的危机。探索循环经济理论,使水泥混凝土工业走向可持续发展的道路,这是我国建材工业面临的重大课题。目前,我国生产、应用和研究的细骨料大体上可以概括为三种: 天然沙、人工沙和再生细骨料。利用再生骨料是当今世界众多国家可持续发展战略追求的目标之一,也是发展绿色混凝土的主要措施。

另外,自改革开放以来,我国的建筑、陶瓷工业发展迅速,形成了广东、福建、浙江、山东、河北、河南、四川及上海等八大建筑陶瓷生产区域,我国建筑陶瓷砖产量已连续 8 年居世界第一。陶瓷业随着产量的增加,废料的数量越来越多,根据不完全统计: 仅佛山陶瓷产区,各种陶瓷废料的年产量已经超过 400 万 t,而全国陶瓷废料的年产量在 1 000 万 t 左右。而我国陶瓷废料的再生利用等环保处理尚处于初级阶段,只有少量的废料得以回收利用,其他一般采取简单填埋处理,属于污染较严重的行业。陶瓷废料的堆积挤占土地,影响当地空气质量,而陶瓷废料的填埋耗费人力物力,还污染地下水水质,目前大量的陶瓷固体废料的排放和堆积已经严重地影响我国陶瓷行业的可持续发展,如何变废为宝,化废料为资源,已经成为科技和环保部门的当务之急。目前,要真正解决陶瓷废弃物的污染问题,必须结合当地工程特点,开发大宗利用陶瓷废弃物的项目。

环保工业是 21 世纪的一个重要发展领域,世界各国都投入大量资金用于环境保