

夯实水泥土桩 复合地基技术

HANGSHI SHUINI TUZHUANG
FUHE DIJI JISHU XINJINZHAN

新进展

张振拴 王占雷 杨志红 李占强◎主编

中国建材工业出版社

夯实水泥土桩复合地基 技术新进展

张振拴 王占雷 杨志红 李占强 主编

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

夯实水泥土桩复合地基技术新进展/张振栓等主编.

—北京:中国建材工业出版社,2007.11

ISBN 978-7-80227-318-4

I. 夯… II. 张… III. 桩基础—人工地基—地基处理

IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139350 号

内 容 提 要

本书阐述了夯实水泥土桩复合地基技术的研究新进展。书中详细论述了夯实水泥土桩的作用机理、夯实水泥土及桩周土的微观结构、承载特性和变形特性、夯实水泥土桩复合地基施工及质量控制、夯实水泥土桩复合地基基床系数、夯实水泥土桩复合地基可靠度分析,并列举了大量的工程应用实例,为该技术的进一步推广应用提供了科学研究数据、理论依据和工程应用实践经验。

夯实水泥土桩复合地基技术新进展

张振栓 王占雷 杨志红 李占强 主编

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街6号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18

字 数:443千字

版 次:2007年11月第1版

印 次:2007年11月第1次

书 号:ISBN 978-7-80227-318-4

定 价:33.00元

本社网址: www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010) 88386906

编 委 会

主 编	张振拴	王占雷	杨志红	李占强		
副主编	刘亚庄	郭忠贤	刘春原	梁玉国	沈振元	杨印胜
编 委	强万明	李金山	周保良	商冬凡	何彦敏	刘瑞华
	高聚英	杨 波	张英义	檀西乐	田文辉	梁耀哲
	赵常洲	韩宝玉	曲兆海	张立军	刘国宾	邵英秀
	刘炳瑞	王孟科	王 琴	付士峰		

前 言

随着我国经济建设的快速发展,各种高、新建筑工程日益增多,对地基承载力和沉降要求更高,而很多天然地基已不能满足需要,采用地基处理技术可收到良好的加固效果,不少地基的处理是通过形成复合地基以达到提高地基承载力、降低沉降的目的的。

夯实水泥土桩复合地基技术是复合地基技术的一种,目前是我国北方地下水位较深的地区加固软土地基普遍采用的一项新技术。该项技术施工方便、加固效果显著、质量易控制、施工速度快,且造价低廉,具有明显的经济效益、社会效益,被国家建设部列入建筑业重点推广的10项新技术之一。

夯实水泥土桩复合地基技术,最早由闫明礼等人于1991年对夯实水泥土桩的作用机理、设计计算、施工工艺等进行了试验研究,通过了技术鉴定,在北京和河北建设工程中大量应用。之后,围绕该项技术,广大岩土工程科研教学和工程技术人员进行了深入研究,开发了多项课题,取得了非常有价值的研究成果。

本书是对这些研究成果全面、系统的总结,阐述了夯实水泥土桩复合地基技术的研究新进展,详细论述了夯实水泥土桩的作用机理、夯实水泥土及桩周土的微观结构、承载特性和变形特性、夯实水泥土桩复合地基施工及质量控制、夯实水泥土桩复合地基基床系数、夯实水泥土桩复合地基可靠度分析,并列举了大量工程应用实例,为该技术的进一步推广应用提供了科学研究数据、理论依据和工程应用实践经验,有一定的参考应用价值。本书可供建筑工程勘察、岩土工程设计施工、工程质量检测监督、质量管理技术人员及高等院校有关专业师生参考、借鉴。

本书在编著过程中,河北省建设厅、河北省建筑科学研究院、河北工业大学、河北大地土木工程有限公司等单位给予了热情的帮助和大力的支持,在此表示衷心感谢。限于编者的经验和水平,书中可能会有遗漏、不足之处,敬请各位专家、同行批评指正。

编委会

2007年9月

目 录

第1章 概 论	1
1.1 复合地基	1
1.1.1 复合地基的定义	1
1.1.2 复合地基的分类	3
1.1.3 复合地基技术的发展历史	4
1.2 夯实水泥土桩复合地基	7
1.2.1 夯实水泥土桩复合地基研究现状及分类	7
1.2.2 夯实水泥土桩的作用机理	10
1.2.3 夯实水泥土桩复合地基设计计算	13
1.2.4 夯实水泥土桩复合地基研究新进展	18
1.2.5 夯实水泥土桩复合地基的应用	20
第2章 夯实水泥土桩复合地基力学模型及数值模拟分析	22
2.1 夯实水泥土强度与变形特征	22
2.1.1 水泥土强度的影响因素	22
2.1.2 夯实水泥土强度试验方法	24
2.1.3 试验结果分析	25
2.1.4 夯实水泥土在竖向荷载作用下的应力-应变关系	31
2.1.5 桩身及水泥土的变形破坏形式分析	35
2.2 夯实水泥土及桩周土的微观结构	37
2.2.1 水泥土的微观结构分类	37
2.2.2 扫描电子显微镜样品的准备	39
2.2.3 夯实水泥土微观结构特征	40
2.2.4 不同养护龄期夯实水泥土微观结构特征	41
2.2.5 桩周土微观结构分析	46
2.3 承载特性的试验研究	51
2.3.1 试验方法	52
2.3.2 桩、桩间土及复合地基荷载分配规律研究	55
2.3.3 竖向荷载作用下复合地基桩土应力比	61
2.3.4 褥垫层对复合地基承载特性的影响	64

2.4 变形特性的试验研究	72
2.4.1 不同条件下夯实水泥土单桩和复合地基变形特性	72
2.4.2 单桩及多桩复合地基条件下桩和桩间土的变形特征	76
2.4.3 褥垫层对夯实水泥土桩复合地基变形特性的影响	80
2.4.4 夯实水泥土桩复合地基变形规律研究	84
2.5 承载和变形特性的本构模型	86
2.5.1 复合地基弹塑性本构模型的理论框架	86
2.5.2 夯实水泥土桩复合地基的弹塑性本构模型	90
2.5.3 模型的建立	91
2.5.4 模型参数的确定	94
2.6 夯实水泥土桩复合地基数值模拟	96
2.6.1 复合地基中应力场和位移场变化规律	96
2.6.2 褥垫层厚度对复合地基桩土应力影响分析	101
2.6.3 复合地基变形特性的模拟计算	103
第3章 夯实水泥土桩复合地基计算参数的研究	105
3.1 承载力参数分析拟合	105
3.1.1 载荷试验数据拟合模型	106
3.1.2 数据拟合结果及各模型的比较	110
3.2 变形计算参数分析及计算	128
3.2.1 夯实水泥土桩复合地基基础 $p-s$ 曲线征及承载力	128
3.2.2 竖向荷载作用下的受力特性	132
3.2.3 竖向荷载作用下的变形特性	141
3.2.4 复合地基中典型单元的受力分析	147
3.2.5 复合地基的沉降计算方法	150
第4章 夯实水泥土桩复合地基施工及质量控制	152
4.1 现场施工	152
4.1.1 施工准备	152
4.1.2 材料	152
4.1.3 机具设备与施工	152
4.2 褥垫层施工	154
4.3 施工质量控制	154
4.3.1 成孔、成桩施工质量控制	154
4.3.2 配合比及水泥强度	155
4.3.3 土及含水量	155
4.3.4 填料量与夯击能	155
4.3.5 夯实水泥土桩复合地基质量控制	156

4.4 夯实水泥土桩工程监理	156
4.4.1 施工监理依据标准	156
4.4.2 施工前监理	157
4.4.3 材料监理	157
4.4.4 施工监理	158
4.4.5 褥垫层监理	158
4.4.6 施工质量控制监理	158
4.4.7 质量检验监理	158
4.4.8 工程监理	159
4.5 质量检验及工程验收	160
4.5.1 按设计布桩图检验桩位及桩数	160
4.5.2 夯实水泥土桩桩体质量的抽检数量	160
4.5.3 夯实水泥土桩桩体夯实质量的检查	160
4.5.4 承载力检验和载荷试验	161
4.5.5 承载力检验载荷试验时间和检验数量	162
4.5.6 复合地基载荷试验应按以下要求进行	162
4.5.7 水泥土桩如检验不合格应采取有效的补救措施	163
4.5.8 工程验收	163
第5章 夯实水泥土桩复合地基基床系数	164
5.1 承载力的确定	164
5.2 基床系数的确定	164
5.3 极限承载力、承载力特征值与基床系数的经验关系	165
5.4 变形模量与基床系数的经验关系	172
第6章 夯实水泥土桩复合地基可靠度分析	174
6.1 可靠度理论分析基础	174
6.1.1 桩土应力传递规律有限元分析	174
6.1.2 极限状态方程	181
6.1.3 随机变量的统计规律	182
6.1.4 可靠度计算方法及程序	186
6.2 可靠度分析	187
6.2.1 辛集市园丁小区5#楼工程	187
6.2.2 河北省外贸厅物资站2#楼工程	193
6.2.3 石家庄经济学院计算机中心工程	200
6.2.4 石家庄师范专科学校新校区扩建教学楼(三)工程	208
6.2.5 计算结果	214

第7章 夯实水泥土桩复合地基工程实例	215
7.1 石家庄市光明实业总公司长青路6#住宅楼	215
7.1.1 工程概况	215
7.1.2 岩土工程地质条件	215
7.1.3 设计、施工依据	217
7.1.4 地基处理设计	217
7.1.5 静载试验	217
7.1.6 结论	221
7.2 辛集市审计局4#住宅楼	221
7.2.1 工程概况	221
7.2.2 岩土工程地质条件	221
7.2.3 设计、施工依据	223
7.2.4 地基处理设计	223
7.2.5 静载试验	223
7.2.6 结论	228
7.3 石家庄天人化工设备有限责任公司住宅楼	228
7.3.1 工程概况	228
7.3.2 岩土工程地质条件	228
7.3.3 单桩复合地基静载试验	229
7.3.4 试验数据整理	230
7.3.5 结论	233
7.4 辛集市芳苑东区6#住宅楼	233
7.4.1 工程概况	233
7.4.2 工程地质概况	233
7.4.3 夯实水泥土桩工程设计	234
7.4.4 单桩复合地基静载荷试验成果	234
7.4.5 结论	237
7.5 石家庄卷烟厂联合工房	237
7.5.1 工程概况	237
7.5.2 场地地质条件	237
7.5.3 夯实水泥土桩复合地基施工	238
7.5.4 夯实水泥土桩施工效果	238
7.5.5 结论	239
7.6 辛集市文化艺术中心	239
7.6.1 工程概况	239
7.6.2 岩土工程条件	240
7.6.3 复合地基设计方案	240

7.6.4	主要施工工艺	244
7.7	北京大兴区某工程	244
7.7.1	工程及地质概况	244
7.7.2	地基基础设计条件	245
7.7.3	地基处理方案的优化	245
7.7.4	夯实水泥土桩设计	245
7.7.5	关键工序及控制措施	246
7.7.6	加固效果检测	246
7.7.7	结论	247
7.8	辛集市正源粮业公司 2 [#] 住宅楼	247
7.8.1	工程概况	247
7.8.2	设计计算	247
7.8.3	施工及质量控制	248
7.8.4	加固效果检测及分析	248
7.8.5	结论	250
7.9	青州市国税局宿舍楼	250
7.9.1	前言	250
7.9.2	工程及地质概况	250
7.9.3	设计与施工	251
7.9.4	加固效果检验	251
7.9.5	经济技术效果	251
7.9.6	结论	252
7.10	中国银行保定分行住宅楼、办公楼	252
7.10.1	工程概况	252
7.10.2	拟加固场地工程地质条件	252
7.10.3	复合地基设计	253
7.10.4	工程检测	254
7.10.5	结论	255
7.11	石家庄钢铁股份有限公司中型轧机厂厂房改造工程	255
7.11.1	工程概述	255
7.11.2	地基处理方案选择	256
7.11.3	设计方案	258
7.11.4	施工质量控制	259
7.11.5	检测	259
7.11.6	结论	259
7.12	石家庄大学主教学楼	259
7.12.1	工程简介	259
7.12.2	工程地质概况	259

7.12.3	施工工艺	260
7.12.4	设计与布桩	260
7.12.5	处理效果检验	261
7.12.6	结论	262
7.13	邢台市某砖混结构住宅楼	262
7.13.1	工程概况	262
7.13.2	工程地质	262
7.13.3	设计计算	263
7.13.4	施工及检测	264
7.13.5	单桩载荷试验	264
7.13.6	结论	264
7.14	邢台县房管处2 [#] 住宅楼	265
7.14.1	工程概况	265
7.14.2	工程地质条件	265
7.14.3	地基加固设计	266
7.14.4	承载力计算	266
7.14.5	夯实水泥土桩实施	267
7.14.6	地基处理效果测试	267
7.15	中国人民解放军军械工程学院住宅小区6 [#] ~11 [#] 住宅楼	268
7.15.1	工程概况	268
7.15.2	岩土工程地质条件	269
7.15.3	设计、施工依据	270
7.15.4	夯实水泥土桩复合地基设计	270
7.15.5	夯实水泥土桩复合地基施工	271
7.15.6	单桩复合地基静载试验	272
7.15.7	结论	273
参考文献		274

第1章 概 论

1.1 复合地基

自1962年国际上开始使用“composite foundation”（复合地基）一词以来，复合地基应用广泛。复合地基就是由两种模量不同的材料（桩间土和桩体）组成的，在相对刚性基础下两者共同分担上部荷载并协调变形的人工地基。它的理论已被广泛用于碎石桩、石灰桩、CFG桩、水泥土搅拌桩、夯实水泥土桩、旋喷桩等加固地基的设计计算之中，成为众多地基处理方法、理论分析及公式建立的基础和依据。

目前，复合地基的研究方法是在多根桩所加固的地基中，选取一根桩及其所影响的桩周土所组成的单元体作为研究对象。同天然地基比较，二者同属地基范畴；但前者为人工地基，后者是天然地基。复合地基与桩基都是以桩的形式处理地基，但复合地基属地基范畴，复合地基的受力特性是主要受力层在加固体内，群桩效应不明显，桩与土协调变形；而桩基属基础范畴，桩基的受力层在桩尖以下一定范围内，当桩距 $s \leq (3 \sim 4)d$ 时，群桩效应明显，尤其是摩擦桩。复合地基犹如钢筋混凝土，其中地基中的桩体犹如混凝土中的钢筋，它的实质就是考虑桩土共同作用，这无疑比荷载仅由桩体承担要经济合理。

复合地基中桩的作用是主要的，而处理时采用的桩类型较多，且性能变化较大，故复合地基类型按桩型划分较为妥当。目前趋于两种分类方法。一种是按成桩材料划分：散粒体土类桩（如碎石桩，砂桩等）、水泥土类桩（如水泥土搅拌桩，夯实水泥土桩，旋喷桩等）、混凝土类桩（树根桩，CFG桩）等；另一种是按成桩后桩体的强度划分：柔性桩（如散体土类桩）、半刚性桩（如水泥土类桩）、刚性桩（如混凝土类桩）。半刚性桩中，水泥掺入比大小将直接影响桩体强度。当水泥掺入比数值比较小时，半刚性桩的特性类似柔性桩；当水泥掺入比值大时，半刚性桩的特性类似刚性桩。由柔性桩与桩间土组成柔性桩复合地基；半刚性桩与桩间土组成半刚性桩复合地基；刚性桩与桩间土组成刚性桩复合地基。

1.1.1 复合地基的定义

房屋建筑通常是由上部结构和基础两大部分组成的。基础是承受上部结构荷重并将荷重传到基础以下土层的结构。承受基础传来的建筑物荷载的这一部分土称为地基。

桩基是桩基础的简称，是一种广义的深基础，它由桩和连接桩顶的承台组成。

复合地基是在天然土中设置一定比例的增强体，并由天然土和增强体共同承担由基础传来的建筑物荷载，称为复合地基。图1-1为复合地基施工现场。

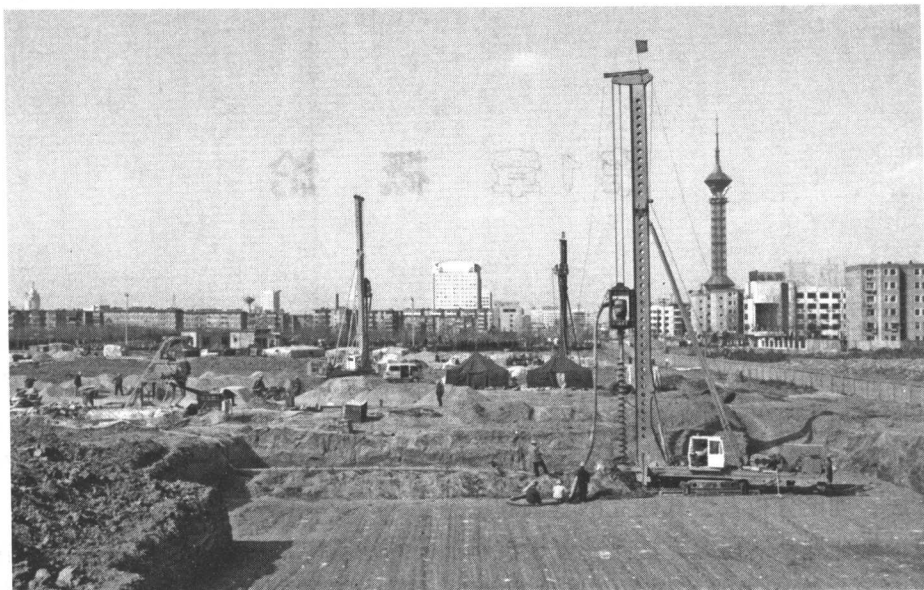


图 1-1 复合地基施工现场

增强体是由强度和模量相对于天然土高的材料组成，习惯上将纵向增强体称作桩。例如由碎石组成的纵向增强体叫碎石桩；由水泥和土搅拌形成的纵向增强体叫水泥土桩；由水泥、粉煤灰、碎石组成的纵向增强体叫水泥粉煤灰碎石桩（图 1-2）。



图 1-2 (CFG) 水泥粉煤灰碎石桩

需要特别指出的是，不论是碎石桩、水泥土桩，还是强度和模量很大的水泥粉煤灰碎石桩，都视为天然土体中的增强体，它和天然土一起形成复合土体，属地基范畴。

1.1.2 复合地基的分类

1. 复合地基技术在我国得到了广泛的应用和发展。据不完全统计,在地基处理中应用的桩型不下十几种,其中应用比较广泛的有:

- (1) 振冲碎石桩复合地基;
- (2) 干振碎石桩复合地基;
- (3) 土桩复合地基;
- (4) 灰土桩复合地基;
- (5) 石灰桩复合地基;
- (6) 深层搅拌水泥土桩复合地基;
- (7) 粉喷水泥土桩复合地基;
- (8) 夯实水泥土桩复合地基;
- (9) 水泥粉煤灰碎石桩复合地基(即 CFG 桩复合地基)。

显然,上述复合地基主要是由增强体材料性质和成桩工艺而定名的。例如,增强体材料为水泥土,则称为水泥土桩复合地基。而按施工工艺不同又分为深层搅拌桩(由水泥浆与天然土强制搅拌而成)复合地基、粉喷桩(由水泥粉与天然土强制搅拌而成)复合地基、旋喷桩(由高压喷射注浆旋喷法形成的水泥土桩)复合地基和夯实水泥土桩(由在孔外将水泥粉和过筛的土均匀拌和、分层回填夯实而成)复合地基。

又如,桩体材料为碎石的称为碎石桩复合地基,根据施工工艺的不同又可分为振冲碎石桩复合地基、干振碎石桩复合地基、振动沉管挤密碎石桩复合地基和强夯置换碎石桩复合地基等。

许多学者基于试验研究和工程应用方面的考虑,按桩体材料的性状、施工工艺和桩在复合地基的承载特性,对复合地基进行分类。

2. 按成桩材料分类如下:

- (1) 散体土类桩。如砂(砂石)桩、碎石桩等。
- (2) 水泥土类桩。如水泥土搅拌桩、夯实水泥桩、旋喷桩等。
- (3) 混凝土类桩。如 CFG 桩、树根桩等。

3. 按桩体刚度的分类如下:

- (1) 柔性桩。散体土类桩属此类桩。
- (2) 半刚性桩。如水泥土类桩。
- (3) 刚性桩。混凝土类桩。

4. 根据桩体材料性状,特别是桩体置换作用的大小,将复合地基分类如下:

- (1) 散体桩复合地基。如砂桩、碎石桩为增强体的复合地基。
- (2) 一般粘结强度桩复合地基。如石灰桩,水泥土桩为增强体的复合地基。

对一般粘结强度桩复合地基也可再细分为:

低粘结强度桩复合地基。如石灰桩复合地基。

中等粘结强度桩复合地基。如旋喷桩、夯实水泥土桩为增强体的复合地基。

- (3) 高粘结强度桩复合地基。如 CFG 桩复合地基。

桩体粘结强度的变化,对复合地基的工作性状影响很大。按桩体材料粘结强度分类,有助于对复合地基个性的认识和系列化研究。

复合地基中的桩体为同一种材料的称为单一桩型复合地基。这类复合地基可以是桩径相同,而桩距和桩长不同。如图 1-3 所示的土层②、④为相对硬土层,考虑到复合地基中桩距既不宜过大,也不宜过小,当全部采用短桩方案时,承载力和变形不能满足设计要求,当全部采用长桩方案时,设计又过于保守。此时可采用长、短桩相结合的复合地基方案。

由两种或两种以上类型的桩组成的复合地基,称为多桩型复合地基。例如,图 1-4 所示的可液化地基,设计中,既要求消除土体的液化,又要求有很高的复合地基承载力。当用单一的振冲碎石桩或振动沉管挤密碎石桩加固地基,虽然可以消除液化,但承载力达不到设计要求。此时,可采用碎石桩加振动沉管 CFG 桩多桩型复合地基方案,以达到既消除地基的液化又大幅度提高承载力的目的。

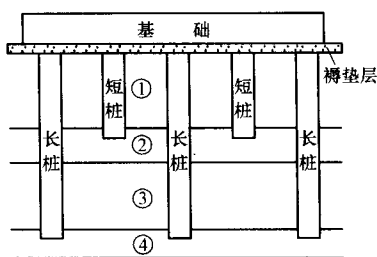


图 1-3 同一桩体材料不同桩长组成的复合地基

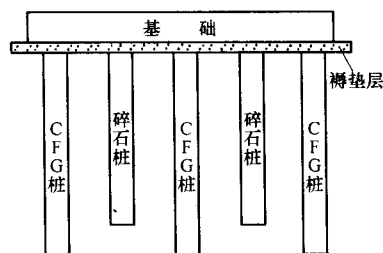


图 1-4 多桩型复合地基

当基础底面以下的地基土有相对软的土层或平面上局部有较软土层时,可采用水泥土桩;软土层不厚且无地下水时可用夯实水泥土桩加固,然后再打设模量更高的桩,如 CFG 桩等,形成多桩型复合地基,应用效果也很好。

1.1.3 复合地基技术的发展历史

19 世纪 30 年代,复合地基技术起源于欧洲,目前已发展为多种类型:砂桩复合地基、碎石桩复合地基、石灰桩复合地基、水泥土桩复合地基、低强度桩复合地基等。早在 1835 年法国人就提出了碎石桩,但直至 1930 年,才由德国人 S. Steuerman 提出振冲碎石桩加密砂性土的原理,并于 1935 年应用于砂土地基。20 世纪 50 年代末,振冲法开始用于加固黏性土地基。我国于 20 世纪 50 年代引进砂桩工艺,至 70 年代中期引进振冲法加固技术,后来砂桩技术在交通、水利、建筑中获得了广泛的应用,如青藏铁路路基加固、官厅水库大坝基础加固及上海宝钢公司原材料堆场地基加固,并在工程实践基础上总结出碎石桩的适用场合和条件。国内一般认为,当天然地基土的不排水抗剪强度大于 20kPa 时,采用振冲碎石桩处理加固效果良好,但在人口密集地区和没有排污泥场地时使用则受到限制。为克服振冲施工排污泥缺点,各国都致力于研究干法振冲,后来又相继开发出锤击碎石桩(图 1-5)、振挤碎石桩和干振碎石桩等(图 1-6)。



图 1-5 锤击碎石桩复合地基施工



图 1-6 干振碎石桩复合地基施工

20 世纪 50 年代以前,石灰桩主要用于处理浅层地基,但随着建设规模的扩大,开始将其用于深层地基处理。天津市自 1953 年开始用石灰桩加固软土地基,并对石灰桩的应用范围、承载力估算、施工机具及操作步骤进行了初步的总结。至 70 年代,浙江、江苏、湖北、陕西等省先后采用此法成功地对软弱地基进行了处理。

水泥土搅拌法 (CDM-Cement Deep Mixing Method) 是美国在第二次世界大战后研制成功的,这种方法是通过特制的深层搅拌机械在地基深处将软土和固化剂就地强制搅拌,由固化剂和软土产生的一系列物理-化学反应,使软土硬结成具有整体性、水稳性和一定强度的水泥加固土,从而与桩间土一起构成水泥土搅拌桩复合地基。1953 年日本引进该方法,60 年代末开始致力于此项技术研究,1974 年研制成水泥搅拌固化法,并在搅拌注浆的基础上开发出高压喷射注浆法 (它是应用高压水射流切割技术而发展起来的)。

我国是继日本之后,研究开发和应用水泥土搅拌法较早的国家,1975 年首次在铁道部门进行试验和应用,至今已有上百项工程应用了高压喷射注浆法,所研制成功的高压喷射注浆防渗新工艺和淤泥地层高喷灌浆新技术均处于世界前列,解决了在大颗粒动水条件下施工中的技术难题,拓宽了该项技术的应用范围。该方法已成为我国常用的复合地基处理方法之一,并列入了我国国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202—2002) 和国家行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002) 和部分省市的地基处理规范中。

我国于 1978 年对水泥土搅拌桩方法进行研究,1979 年在天津塘沽新港进行工程试验,1980 年利用水泥搅拌桩处理上海宝钢总厂软土地基取得了成功。国外使用水泥土搅拌法加固的土质有新吹填的超软土、泥炭土和淤泥质土等饱和软土。加固场地从陆地软土到海底软土,加固深度达 60m。国内目前采用水泥土搅拌法主要用来加固软土地基及地基承载力标准值不大于 120kPa 的黏土和粉土等地基。如果软土地基含水量过大,则可采用喷粉的方法来加固。

粉喷桩技术是1967年瑞典人KjeldPaus提出的,他使用石灰搅拌桩加固15m深度范围内软土地基,并于1971年现场制成一根用生石灰和软土搅拌桩,这标志着粉喷桩技术的产生。粉喷技术在软土地基加固中具有造价低、适用范围广及效果好等优点,因此得到迅速推广。

中国建筑科学研究院地基所在20世纪80年代末期研制开发了水泥粉煤灰碎石桩(简称CFG桩),它是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和形成的高粘结强度桩。它和粉煤灰和生石灰低强度混凝土桩复合地基及水泥碎石桩复合地基都是近年来国内外新开发的地基处理技术,主要用来加固粉质黏土、非饱和黏土、饱和软黏土及淤泥质土。这些复合地基的出现,大大拓宽了地基处理的应用领域,同时粉煤灰等工业废料的综合利用,也有效降低了地基处理的费用。目前,该项技术已在全国23个省、市、自治区推广应用,特别是近几年来,CFG桩复合地基技术在高层建筑地基中广泛应用,现已成为应用最普遍的地基处理技术之一(图1-7、图1-8)。

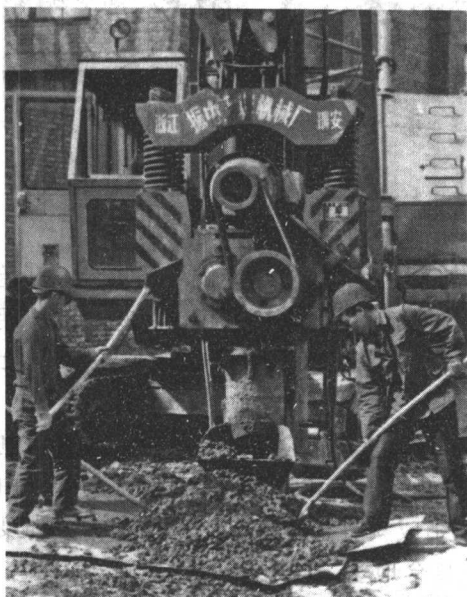


图1-7 外旋管护壁CFG桩复合地基施工

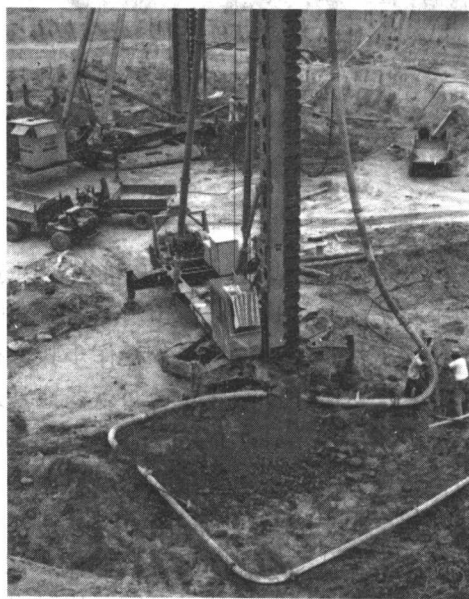


图1-8 压灌CFG桩复合地基施工

近年来,地基处理中另一个引人注目的发展是大桩距(一般超过5~6倍桩径)的较短钢筋混凝土疏桩复合地基的出现。疏桩基础是一种介于传统概念上的桩基与复合地基之间的一种新的地基基础形式,属于变形控制设计理论范畴,反映了桩土共同作用的最新研究成果。采用合理的布桩率的疏桩基础不仅工程造价低,而且建筑物沉降也能控制在允许的范围内。疏桩基础设计理论的逐步完善,将使疏桩基础复合地基的应用越来越广。

夯实水泥土桩技术自1991年中国建筑科学研究院地基基础研究所开发出夯实水泥土桩以后,与河北省建筑科学研究院一起,对其物理力学性能做了试验测试,对该桩的力学特性、适用范围、施工工艺及其特点进行了详细研究。但由于现场搅拌水泥土桩(浆喷、粉喷)存在有桩身强度不均匀、桩身强度过分依赖于水泥的胶结作用等问题,该种桩的特点是水泥和土在孔外拌和,然后填入孔内强力夯实,因而其强度、桩体密度、抗冻性等均优于搅拌水泥土桩。桩体强度是以水泥的胶结作用为主要因素,但桩身干密度的增加也是桩体强