



粉喷桩复合地基 理论与工程应用

THE PRINCIPLE AND APPLICATION
OF DRY JET MIXING
COMPOSITE FOUNDATION

刘松玉 钱国超 章定文 编著



中国建筑工业出版社

粉喷桩复合地基 理论与工程应用

刘松玉 钱国超 章定文 编著

中国建筑工程出版社

图书在版编目(CIP)数据

粉喷桩复合地基理论与工程应用 / 刘松玉, 钱国超, 章定文编

著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-08679-5

I. 粉… II. ①刘… ②钱… ③章… III. 桩基础—人工地基 IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 122941 号

本书是汇集了国内外粉喷桩加固软土地基的最新研究成果, 并总结作者近十年的相关研究成果编写而成。本书内容包括: 水泥土的工程特性, 粉喷桩与浆喷桩的特点, 粉喷桩选择的原则, 粉喷桩单桩破坏模式与承载力确定的方法, 粉喷桩复合地基的破坏模式、固结特性与计算方法等, 国内外粉喷桩的施工工艺特点, 现场施工质量保证措施, 国内外关于粉喷桩质量检验的技术及实用的质量控制方法, 最后给出了粉喷桩的工程应用实例。内容丰富, 实用。

本书适合从事建筑地基及高速公路、铁路、桥梁地基处理的设计、施工、管理人员及高校师生、科研人员参考使用。

责任编辑: 王 梅

责任设计: 董建平

责任校对: 邵鸣军 张 虹

粉喷桩复合地基理论与工程应用

刘松玉 钱国超 章定文 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京天成排版公司制版

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{1}{4}$ 字数: 432 千字

2006 年 12 月第一版 2006 年 12 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 38.00 元

ISBN 7-112-08679-5

(15343)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

粉体喷射搅拌技术是就地搅拌桩技术的一种,于20世纪70年代由日本和瑞典分别开发并应用,在欧洲、日本、美国地基处理工程中得到了广泛应用。1996年、2000年、2005年分别在日本、瑞典召开了国际深层搅拌技术大会,国际粉喷桩搅拌技术一直处于快速发展之中。我国于1983年引进此项技术,首先应用于铁路箱涵软土地基加固工程中,取得了良好的经济效益和社会效益,此后在铁路、公路、市政工程、港口码头、工业与民用建筑等软土地基加固方面得到了大量推广应用。

粉喷桩具有振动小、噪声低、无污染、速度快、施工机械简单、施工效率高和造价相对较低等优点。但国内工程实践表明,粉喷桩应用过程中经常出现一些问题,如:深部成桩效果差,处理深度有限;当存在临空面时,粉喷桩施工会引起边坡失稳;有时会引起地面开裂,构筑物受损等现象;施工完后的粉喷桩会突然下沉等;这些问题曾造成工程界对粉喷桩技术与处理效果产生怀疑,许多地方甚至限用。

近年来随着我国高速公路、高速铁路等基础设施建设的发展,粉喷桩技术在软土地基处理工程中得到了更多的应用,并进行了进一步的研究,取得了丰富的成果。本书即是汇集了国内外粉喷桩加固软土地基的最新研究成果,并总结了作者近十年的相关研究成果编写而成。本书内容具有以下特点:

1. 对水泥土工程特性进行了全面总结。在总结水泥土常规物理力学性质基础上,重点介绍了国内外关于水泥土强度的预测方法,并分析了长期强度、动力特性、电阻率特性等。
2. 分析了粉喷桩与浆喷桩的特点,提出了粉喷桩选择的原则,并详细介绍了粉喷桩单桩破坏模式与承载力确定的方法。
3. 阐述了粉喷桩复合地基的破坏模式(圆弧滑动剪切破坏、弯曲破坏、倾斜破坏、桩间土的破坏等)、固结特性与计算方法等。
4. 总结了国内外粉喷桩的施工工艺特点,分析了施工机械和施工工艺中诸多因素对粉喷桩加固效果的影响规律:包括搅拌叶片的形状、数量、布置形式以及搅拌轴旋转速率、贯入与提升速率等,提出了现场施工质量保证措施。
5. 详细介绍了国内外关于粉喷桩质量检验的技术,并推荐了实用的质量控制方法。
6. 对国内外水泥粉喷桩技术的最新研究成果和发展动态进行了分析。详细介绍了实用的排水粉喷桩复合地基技术、整体加固技术等新工艺。

本书在编著过程中,参考了大量文献资料和研究报告,特向提供资料的个人和单位表示由衷的感谢!特别要感谢江苏省高速公路建设指挥部的各位领导多年来给予作者的帮助和鼓励!东南大学岩土工程研究所洪振舜教授、缪林昌教授、杜延军教授、邵俐副教授、朱宜生副教授等对本书完成提供了大量帮助,研究生邓永锋、于小军、储诚富、顾明芬、陈蕾等进行了有关的工作,在此一起表示真诚的感谢!

作者期望以此书推动粉喷桩技术在我国的发展和应用，促进地基处理理论与应用技术的提高，由于水平有限，书中错误和不妥之处，敬请读者不吝赐教。

作者于南京

2006 年 9 月

目 录

- 第一章 绪论 1
 - 第一节 粉喷桩的发展 1
 - 第二节 适用范围..... 5
 - 一、适用土质 5
 - 二、加固深度 6
 - 三、工程应用范围 6
 - 第三节 粉喷桩的特点及其与浆喷桩的差异 11
 - 一、粉喷桩的特点 11
 - 二、粉喷桩与浆喷桩的差异 11
 - 第四节 国内外粉体喷射搅拌新技术 12
 - 一、整体加固技术（Mass Stabilization） 12
 - 二、改进的粉体喷射搅拌工法（MDM） 14
 - 三、2D工法 16
 - 参考文献 16
- 第二章 水泥土的工程特性 18
 - 第一节 加固原理 18
 - 一、水泥加固土的原理 18
 - 二、水泥系固化材料的固化原理 22
 - 三、水泥土的微观结构 24
 - 第二节 水泥土强度的影响因素 28
 - 一、水泥掺入比 29
 - 二、水泥种类 30
 - 三、水泥强度等级 31
 - 四、龄期 31
 - 五、土性 33
 - 六、含水量 35
 - 七、有机质 36
 - 八、外掺剂 40
 - 九、搅拌条件 42
 - 十、养护条件 43
 - 第三节 水泥土的基本物理力学性质 45
 - 一、含水量 45
 - 二、密度 46

三、相对密度	46
四、抗拉强度	46
五、抗剪强度	48
六、变形模量	49
七、压缩模量和体积压缩系数	52
八、渗透系数	53
九、固结屈服应力	58
十、泊松比	59
第四节 基于似水灰比的水泥土强度预测方法	59
一、水泥土强度预测的研究回顾	60
二、基于似水灰比的水泥土强度预测方法	64
第五节 水泥土长期强度	68
一、水泥土的强度增长	68
二、水泥土的强度衰减 (Deterioration)	71
第六节 水泥土的其他特性	74
一、水泥土抗冻性能	74
二、水泥土抗蚀性能	75
三、水泥土动力特性	77
四、水泥土电阻率特性	83
参考文献	90
第三章 粉喷桩单桩设计计算	97
第一节 粉喷桩与浆喷桩的选择	97
一、粉浆喷桩施工效应对比研究	97
二、粉浆喷桩桩体强度的对比	101
三、粉浆喷桩的选择方法	105
第二节 粉喷桩荷载传递规律	108
一、现场试验分析	108
二、理论与数值模拟分析	112
第三节 粉喷桩破坏模式	114
一、水泥土的破坏模式	114
二、单桩破坏模式	115
第四节 粉喷桩单桩承载力计算	121
一、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002) 的计算方法	121
二、采用 SPT 法计算粉喷桩单桩承载力	123
三、Broms 方法	124
参考文献	125
第四章 粉喷桩复合地基理论与计算	127
第一节 复合地基概论	127
一、复合地基概念的发展	127
二、复合地基定义和分类	127

三、复合地基形成条件	128
四、基础刚度对复合地基性状的影响	129
第二节 粉喷桩复合地基设计原则	132
一、设计程序	132
二、设计基本要求	133
第三节 粉喷桩复合地基承载力计算	135
一、粉喷桩复合地基破坏模式	135
二、粉喷桩复合地基承载力计算	138
三、下卧层地基强度的验算	140
第四节 粉喷桩复合地基沉降和固结计算	140
一、复合地基沉降计算模式	140
二、粉喷桩复合地基附加应力计算	140
三、粉喷桩复合地基沉降计算	143
四、粉喷桩复合地基固结计算理论	153
第五节 粉喷桩复合地基稳定计算	166
一、稳定性分析中的强度评价	166
二、粉喷桩复合地基的圆弧滑动稳定性分析	169
参考文献	176
第五章 粉喷桩施工技术	180
第一节 粉喷桩施工的特点	180
第二节 施工机械及配套设备	181
一、国外粉喷桩机施工机械简介	181
二、国内粉喷桩施工机械	183
三、施工机械主要设备	185
四、喷粉计量设备	186
第三节 施工工艺	193
一、地基加固的工艺性设计	193
二、粉体材料	194
三、施工工艺流程	195
四、施工技术	196
五、物料气力输送系统压力损失分析	197
六、施工参数对粉喷桩质量的影响	204
七、粉喷桩施工的环境影响	206
第四节 施工管理	208
一、施工准备	208
二、劳动组织	208
三、施工工艺	209
第五节 施工注意事项	211
一、施工准备	211
二、施工机械	211
三、固化材料的制备	211

四、搅拌施工	212
五、粉喷桩施工常见故障及排除与防治方法	212
参考文献	214
第六章 排水粉喷桩复合地基技术	215
第一节 概述	215
第二节 2D 工法的基本原理与方法	215
第三节 2D 工法的加固机理分析	216
一、粉喷桩施工引起的桩周土中超静孔隙水压力的消散	216
二、排水导气作用对桩身质量的增强效应	220
三、粉喷桩施工过程的气压劈裂	221
第四节 2D 工法现场试验研究	222
一、试验场地简介	222
二、试验内容与布置	223
三、试验成果	224
参考文献	230
第七章 粉喷桩质量控制与质量检测	232
第一节 粉喷桩的质量要求及检测形式	232
一、粉喷桩的质量要求	232
二、质量检测的形式	232
第二节 施工期质量检验	232
第三节 工程竣工后的质量检验	233
一、浅部开挖	234
二、轻型动力触探	234
三、瑞典贯入法	235
四、标准贯入试验	237
五、静力触探试验	238
六、取芯检验	241
七、截取桩段做抗压强度试验	242
八、静载荷试验	242
九、反射波动测法检验	243
十、袖珍贯入试验	245
十一、电阻率法	246
参考文献	250
第八章 工程实例	252
第一节 粉喷桩在沪宁高速公路昆山试验段中的应用	252
一、地基土的物理力学性质	252
二、路堤和粉喷桩设计参数	252
三、粉喷桩现场施工参数	253
四、现场监测方案	253

五、现场载荷试验 253

六、现场测试成果及分析 255

七、小结 264

第二节 粉喷桩在连盐高速公路连云港段中的应用 265

一、工程地质条件 265

二、粉喷桩复合地基设计原则 266

三、粉喷桩桩身质量检测 267

四、现场载荷试验 269

五、现场测试成果及分析 271

六、小结 273

参考文献 273

第一章 绪 论

第一节 粉喷桩的发展

我国地域广大,有各种成因的软土层,其分布范围广、土层厚度大。这类软土的特点是含水量高、孔隙比大、抗剪强度低、压缩性高、渗透性差、受力后沉降稳定时间长。近年来由于工业布局或城市发展规划,经常需要在软土地基上进行建筑施工。由于软土地基不良的物理力学性能,因此需要进行人工加固。软土就地加固是基于最大限度地利利用原土,经过适当的改性后作为地基,以承受相应的外力。

粉体喷射搅拌法是以水泥或石灰等粉体作为加固材料,通过专用的施工机械,用压缩空气将粉体加固料以雾状喷入地基中,凭借钻头叶片的旋转,使粉体加固料与原位地基土的强制搅拌并得到充分混合,使地基土和加固料之间发生固结、水化等一系列反应,从而使软黏土硬结,在短期内形成具有整体性强、水稳性好和足够承载力的柱体。

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。但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(又称为“湿法”搅拌桩,CDM法);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”(又称为“干法”搅拌桩,DJM法)。

粉喷桩的发展历史可追溯到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,利用水泥和土拌合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。

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(MIP)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,桩径0.3~0.4m,长度10~12m。粉体喷射搅拌桩则是于20世纪60年代后期,首先由瑞典和日本分别提出、开发、推广和应用。

1967年瑞典工程师Kjeld Paus提出使用石灰搅拌桩加固15m深度范围内的软土

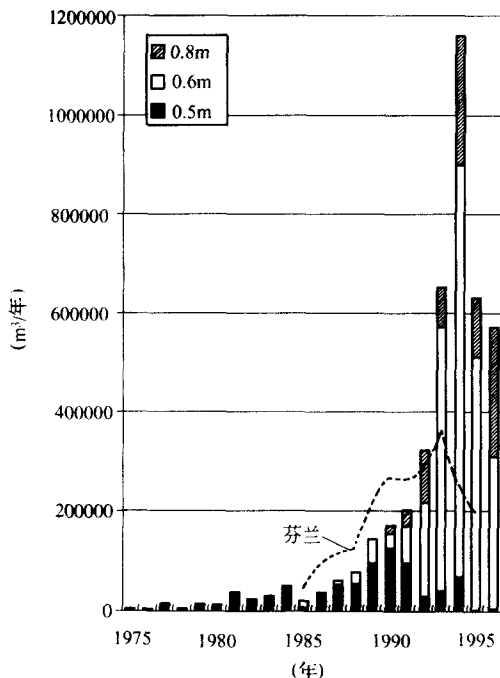


图 1-1 20 世纪瑞典和芬兰粉喷桩加固体数量
(Holm G., 2003)

地基的设想，并于 1971 年在现场制成第一根用生石灰和软土拌制成的搅拌桩，次年在瑞典岩土工程研究所的试验场地进行了石灰搅拌桩的载荷试验，1974 年在瑞典首都斯德哥尔摩以南约 10km 处的呼定 (Hudding) 用石灰粉体搅拌桩作为路堤和深基坑边坡稳定措施。瑞典 Linden-Alimat 公司还制造出专用的粉体搅拌施工机械，桩径可达 500mm，最大加固深度 10~15m。后来，粉喷桩在北欧 (Scandinavia) 地区推广使用，并且固化剂由最初的纯石灰发展到石灰+水泥，以及水泥+其他工业废料等。目前北欧所打设的石灰粉喷桩和石灰-水泥粉喷桩已达数千万延米。图 1-1 给出了瑞典和芬兰在 20 世纪的粉喷桩加固体的发展情况^[1]。北欧地区最常用的粉喷桩施工机械是单搅拌轴的，桩体直径为 0.5~1.2m (多为 0.6~1.0m)，最大加固深度达到了 30m，典型的施工机械如图 1-2 所示^[1]。

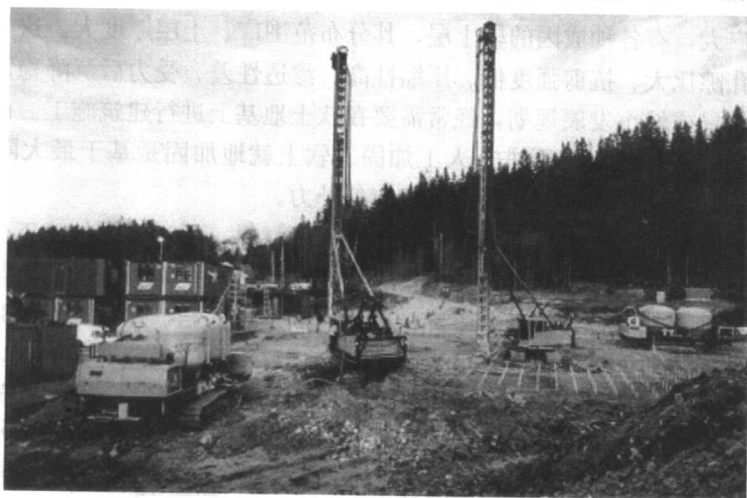


图 1-2 北欧地区最常用的粉喷桩施工机械 (Holm G., 2003)

1953 年日本清水建设株式会社从美国引入就地搅拌桩 (MIP) 施工方法，后开发出以螺旋钻机为基本施工机械的 CSL 法，MR-D 法 (以开发公司名称的首字母命名)。1967 年日本港湾技术研究所参照 MIP 工法的特点，开始研制石灰搅拌施工机械，分别研制成了两类石灰搅拌机械，形成两种施工方法：一类为使用颗粒状生石灰的深层石灰搅拌法 (DLM 法)；另一类为使用生石灰粉末的粉体喷射搅拌法 (DJM 法)。1974 年由于大型软土地基加固工程的需要，由日本港湾技术研究所、川崎钢铁厂和不动建设株式会社等单位对石灰搅拌机械进行改造，合作开发研制成功了水泥搅拌固化法 (CMC 法)，用于加固钢铁厂矿石堆场软土地基，加固深度达 32m。

所谓 DLM 法，是 1965 年日本运输省港湾技术研究所开发的将石灰掺入软弱地基中加以原位搅拌，使之固结的深层搅拌工法。DLM 施工法，如其名称中所指明的那样，是一种以生石灰为固化剂的施工法，施工原理如图 1-3 所示。由两根带有旋转翼片的回转轴及在其中间部位兼作导向柱的固化剂输入管组成，固化剂是从两个搅拌面的交叉部位输入地层中的。通常形成如图 1-3 所示的两个圆叠合形状断面的双柱状加固体。

接着日本各大施工企业接连开发研制加固原理、固化剂相近，但施工机械规格、施工效率各异的深层搅拌机械，形成了多种工法。例如竹中工务店 (株) 的深层水泥搅拌法 (DCM 法)，清水建设 (株) 的深层就地水泥搅拌法 (DeMIC 法)，东亚建设工业 (株) 的深层水泥固结法 (DCCM 法) 等。这些深层搅拌机械一般具有偶数个搅拌轴 (二根、四根或八根)，每个搅拌

翼片的直径可达 1.25m，一次加固的最大面积达到 9.5m²，常在港工建筑中的防波堤、码头岸壁及高速公路高填方下的深厚层软土地基加固工程中应用。

粉体喷射搅拌法(DJM)作为日本建设省综合开发计划中有关“地基加固新技术开发”的一部分，是以建设省土木研究所(施工技术研究室)和日本建设机械化协会(建设机械化研究所)为中心，在 1977 年至 1979 年所开发的专项技术。由于开发了在土中分离加固材料与空气以及排出空气的技术，使工法达到了实用化。DJM 法采用了压缩空气连续通过钻杆向土中喷射水泥粉的技术，其搅拌喷射头如图 1-4。日本搅拌机有单轴和双轴两种，最大加固深度达 33m。2002 年 8 月，日本推出了标准的粉体喷射搅拌法(DJM)施工机械，如图 1-5 所示^[2]。该机械为双搅拌轴，每个轴有两层叶片，且装置在不同高度，搅拌叶片直径 1000mm，最大加固深度达 30m。适用的土层条件为不排水抗剪强度小于 70kPa 的黏性土和标准贯入击数小于 15 的砂土。如果施工作业面或者高度受到限制，可以采用单轴搅拌机。

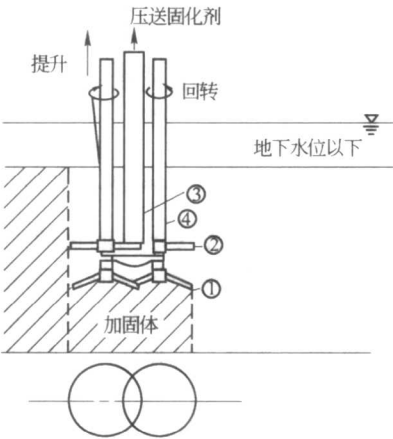


图 1-3 DLM 法的施工原理

①、②搅拌翼片；③固化剂输出口；④搅拌轴

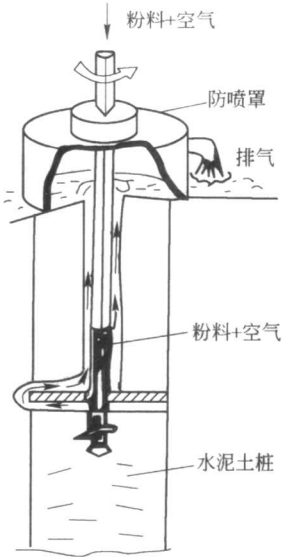


图 1-4 搅拌喷射头

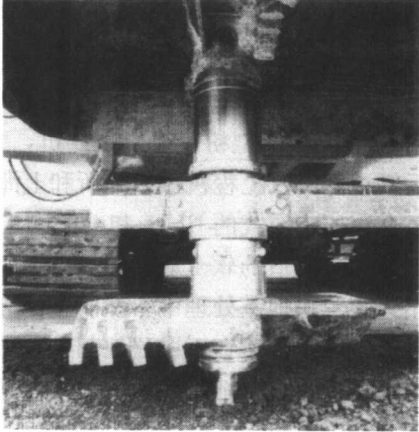


图 1-5 日本陆上工程标准的 DJM 施工机械 (Terashi M., 2003)

由于日本软土分布广泛，粉体喷射搅拌法(DJM)在日本的陆上工程建设中得到了广泛应用。图 1-6 表示了近年来日本采用 DJM 法加固的工程数量与加固体数量，图中同时列出了 CDM 法的应用情况^[2]。

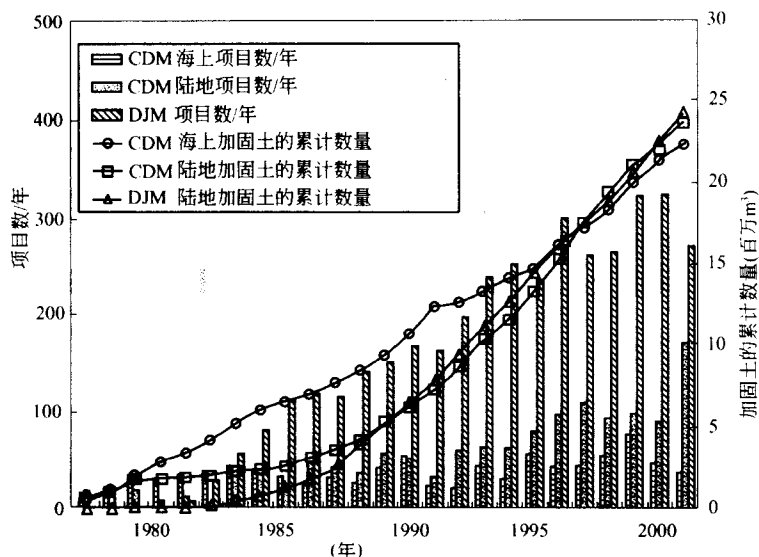


图 1-6 日本采用 DJM 和 CDM 加固的工程数量与加固体数量(Terashi M., 2003)

由于粉体喷射搅拌法采用石灰粉或者水泥粉以及石灰+水泥粉作为固化剂，拌入软土后能吸收周围的水分，产生一定的热量，加速石灰或水泥的物理化学反应，因此加固体的初期强度高，对于含水量高的软土加固效果尤为明显；施工过程中无振动、无污染，对周围环境及建筑物影响很小。在瑞典、芬兰、挪威、法国、英国、联邦德国、美国、加拿大等国家粉体喷射搅拌法在加固软土地基技术得到了广泛应用。

我国铁道部第四勘测设计院于 1983 年初开始进行石灰粉搅拌法加固软土的试验研究，并于 1984 年 7 月在广东省云浮硫铁矿铁路专用线上单孔 4.5m 盖板箱涵软土地基加固工程中应用，使用的深层搅拌机是铁道部第四勘测设计院和上海探矿机械厂共同开发的单头 GPP-5 型桩机，桩径 $\phi 500\text{mm}$ ，桩长 8m，共打设了石灰搅拌桩共 321 根。1985 年 4 月通过铁道部技术鉴定，建议逐步推广使用。后来相继在武昌和连云港用于下水道沟槽挡土墙和铁路涵洞软基加固，均获得良好效果。1988 年，铁道部第四勘测设计院与上海探矿厂联合研制成功 GPP-5 型粉体喷射搅拌机，并通过铁道部和地矿部联合鉴定后投入批量生产。以后铁道部武汉工程机械研究所和上海华杰科技开发公司也先后制造出既能喷粉、又能喷浆，全液压步履式的 PH-5 和 GPY-16 型单轴粉喷桩机。工程实践证明，粉喷桩是一种具有很大推广价值的软土地基加固技术，已广泛应用于铁路、高等级公路、市政工程、工业民用建筑等的地基处理中。然而工程应用中也出现了不少粉喷桩复合地基事故，上海等地相继暂停该项技术在工民建地基处理中的应用。随着我国高速公路建设的发展，粉喷桩复合地基在高速公路地基处理工程中得到了大量应用和发展，成为高速公路地基处理的主要方法之一。

第二节 适用范围

一、适用土质^[3]

国外使用深层搅拌法加固的地基土有新吹填的超软土、沼泽地带的泥炭土、海底沉积的淤泥土和粉土等。我国一开始引进搅拌法技术时,亦用于处理淤泥及淤泥质土。我国关于搅拌法的第一本行业标准为《软土地基深层搅拌加固法技术规程》(YBJ 225—91),1992年9月1日开始施行的《建筑地基处理技术规范》(以下简称91版《规范》)所编入的“深层搅拌法”也规定搅拌法适用处理淤泥、淤泥质土、粉土和含水量较高且地基承载力标准值不大于120kPa的黏性土。但是经过近20余年的规模推广应用后,在《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)(本章以下简称02版《规范》)则规定搅拌法适用于处理:正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、素填土、黏性土、饱和黄土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基。

根据室内试验,一般认为用水泥作固化剂,对含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等黏土矿物的软土加固效果较好;而对含有伊利石、氯化物和水铝石英矿物的黏性土以及有机质含量高、pH值较低的黏性土加固效果较差。

在某些地区的地下水含有大量硫酸盐(海水渗入地区),因硫酸盐与水泥发生反应时,对水泥土具有结晶性侵蚀,会出现开裂、崩角而丧失强度。为此应选用抗硫酸盐水泥,使水泥土中产生的结晶膨胀物质控制在一定的数量范围内,另外也可掺加活性材料例如粉煤灰,藉以提高水泥土的抗侵蚀性能。

在我国北纬40°以南的冬季负温条件下,冰冻对水泥土的结构损害甚微。在负温时,由于水泥与黏土矿物的各种反应减弱,水泥土的强度增长缓慢(甚至停止);但正温后,随着水泥水化等反应的继续深入,水泥土的强度可接近标准强度。

搅拌法加固水下松散砂土应特别注意是否存在地下水径流和承压地下水,否则水泥拌入松砂中,水泥颗粒尚未初凝会被流水冲走将会造成严重事故。尤其是近年来在江河堤防工程中经常使用水泥土(砂)薄墙作为截渗技术,由于水流冲走水泥颗粒,将使墙身渗透破坏比降性能大大降低。

另外,对于采用水泥土搅拌法加固黏性土,在91版《规范》中,在“黏性土”前冠有“含水量较高且地基承载力标准值不大于120kPa”等字样,这是在20世纪80年代由于水泥土搅拌机械制造能力的限制,搅拌机的动力一般不大于30kW,因此遇到地基承载力超过120kPa的地层,搅拌机械不易穿透,穿透耗时过长,影响施工效率,因此规范中有120kPa的限制。但是随着大功率搅拌机械的出现,钻穿150kPa的土层已不成问题,因此02版《规范》中对黏性土已无此限制。

根据土质情况,水泥、水泥系固化材料及生石灰的应用范围,用图1-7加以概括,可供应用中参考^[4]。

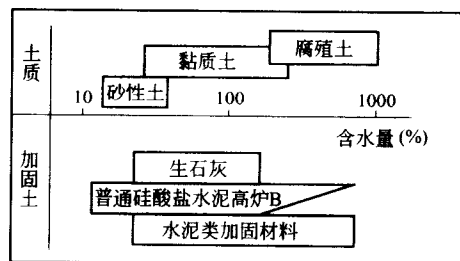


图 1-7 对不同土质选择加固材料简图^[2]

二、加固深度

水泥土搅拌桩的加固深度主要受施工机械的影响。作为竖向受力的水泥土搅拌桩，仅从应力传递的角度而言，有一个所谓“临界桩长”的概念，也就是在桩顶荷载作用下，桩身应力向下传递，由于桩侧摩阻力的作用，桩身应力逐步降低，在桩身一定深度处，桩身应力为零。从桩顶到该深度处的桩长称为“临界桩长”。但这种观点对以沉降作为控制标准的工程来说是不符合要求的。对于软土地区的公路工程，承载力一般均能满足要求，变形往往是设计控制因素。这时，粉喷法的加固深度主要受到施工机械的限制。在日本和北欧，粉喷桩加固软土的深度已达到 30m 以上^[2]；国内由于施工设备的限制，02 版《规范》仍规定粉喷桩的长度不宜大于 15m，工程实践亦表明，采用目前的施工工艺，粉喷桩的施工深度超过 15m，深部质量很难保证。

三、工程应用范围

由于粉喷桩具有许多独特的优点而被广泛应用。在日本，这种方法可用于如图 1-8 所示的这些工程中^[4-5]，主要为建(构)筑物地基、边坡稳定、防渗工程、抗液化加固等。

我国的粉体喷射搅拌桩常用于下列工程中^[6]：

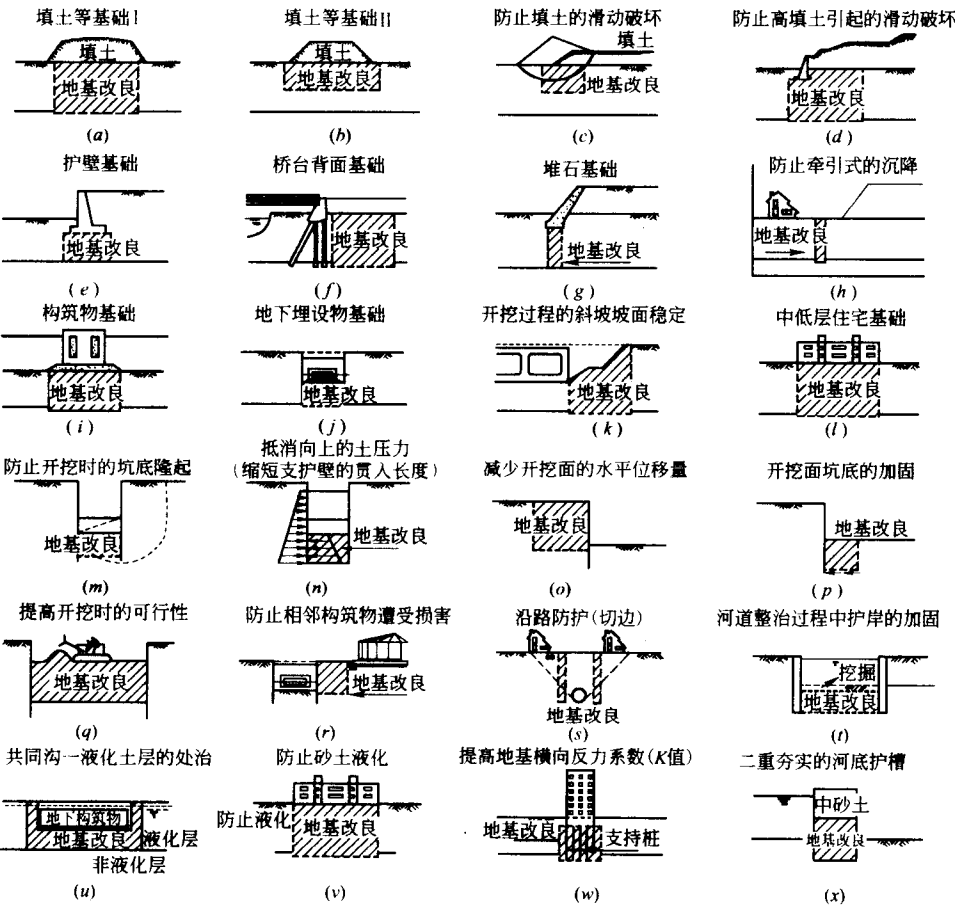


图 1-8 粉喷桩在日本的应用工程类型(喷射搅拌工法研究会, 1993)

1. 地基加固形成粉喷桩复合地基，以提高地基承载力、增大变形模量、减少沉降量。具体应用于下列工程：

- (1) 建(构)筑物的地基加固；如 6~12 层多层住宅，办公楼，单层或多层工业厂房，水池贮罐基础等；
- (2) 高速公路、铁道和机场场道以及高填方堤基等；
- (3) 油罐地基等；
- (4) 大面积堆场地基，包括室内和露天。

根据建筑物基础形式以及承载力和沉降要求，粉喷桩加固体可以分为柱状、壁状、隔栅状、块状等(图 1-9)^[7]。不论何种布置方式，其桩位排列均可采用正方形、长方形或梅花形(图 1-10)，桩距 a 由计算决定。

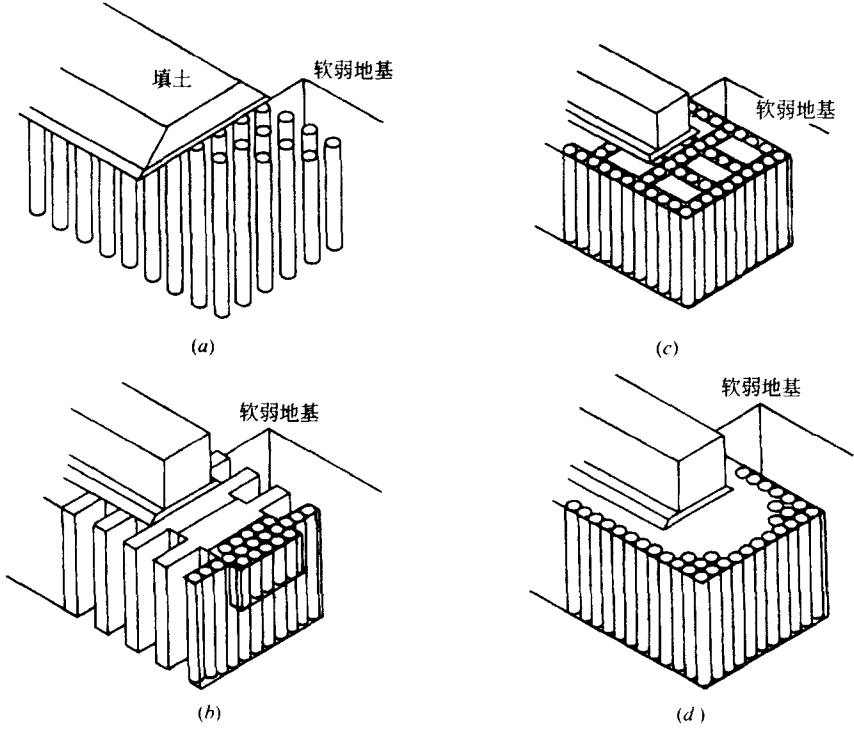


图 1-9 粉喷桩加固断面形式分类(CDIT, 2002)
(a)柱状加固；(b)壁状加固；(c)隔栅状加固；(d)块状加固

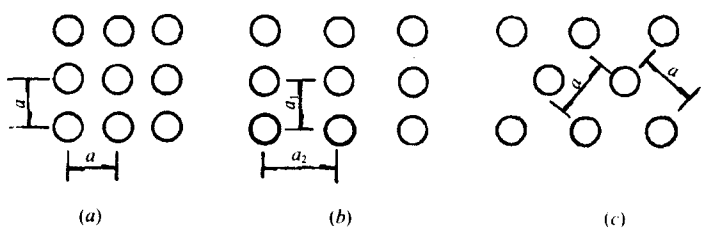


图 1-10 粉喷桩桩位排列图
(a)正方形布孔；(b)长方形布孔；(c)梅花形布孔