

FENPENZHUANG

SHEJIYU
SHIGONG

粉喷桩设计与施工

薛殿基 主编

河南科学技术出版社

粉喷桩设计与施工

薛殿基 主编

河南科学技术出版社

翻膜设计与施工 薛殿基 主编 责任编辑 封延阳

河南科学技术出版社出版

郑州市农业路73号

邮政编码: 450002 电话: (0371) 5721450

河南郑州市丽华胶印厂印刷

全国新华书店发行

开本: 787×1092 1/16 印张: 9 字数: 195 千字

1997年8月第1版 1997年8月第1次印刷

印数: 1—3000 册

ISBN 7-5349-2041-8/T·425 定价: 20.00 元

《粉喷桩设计与施工》编写人员

主 编 薛殿基

副 主 编 胡全舜 朱留定

编写人员 (以姓氏笔划为序)

王业泉 许 柯 张柏山

胡全舜 秦留生 薛殿基

前 言

随着我国对外改革开放政策的实施,我国的国民经济和基本建设都得到了迅速发展,在铁路、公路、水利、工业与民用建筑等建设浪潮中,采用了一种新的地基加固方法——深层粉体喷射搅拌技术,它就是我们所说的粉喷桩技术。在各类工程建设项目中,这种新技术的推广和应用无疑将发挥其特殊的作用。

粉体喷射搅拌技术于20世纪60年代后期由日本和瑞典分别开发应用,我国于80年代初期引入此项技术,首先在沿海地区及长江中下游广泛应用,并取得了良好的社会效益和经济效益,后逐渐向全国各地推广。现在,粉喷桩技术已越来越多地被我国广大科研人员、工程设计人员和工程施工人员认识和接受,其发展前景令人振奋。

目前,国内有关论述粉喷桩技术的书籍和资料还不多,尤其是缺少全面系统介绍其设计和计算方法的著作,这使得粉喷桩技术的推广和应用受到一定的局限。因此,出版一本内容完整、通俗易懂、实用性强的粉喷桩技术专著很有必要。正是从这一点出发,根据已掌握的有关资料和几年来我们在工作实践中的经验,编著了《粉喷桩设计与施工》这本书。书中共分7章,系统论述了粉喷桩的原理和性质、应用范围和特点、施工设备与施工工艺、设计与计算、质量检测与事故处理,并有计算实例。

从实际应用出发,为方便读者,书中在计算方法方面,除列入了粉喷桩设计的直接公式外,还选入了与之相匹配的有关计算公式,如地基承载力设计值计算、地基下卧层计算、地基反力计算、地基沉降计算、土压力计算等。这样,在进行粉喷桩设计时,读者几乎可以不参阅其他书籍,只要拥有本书,就可以完成粉喷桩的全部设计和计算工作。

本书内容系统完整,观点明确突出,具有可靠的操作性和实用性;在表述方式上也有独到之处,通过粉喷桩理论的描述,有机地与相关科学理论,如建筑基础理论、挡土墙理论、质量检测理论等紧密结合起来,从而使读者易于理解和接受。

作者期望本书能为我国的基本建设事业作出贡献,能对各位读者给予帮助。

由于水平所限,书中错误和不妥之处难免,请读者批评指正。

本书在编写过程中,得到了书后所列各参考文献的帮助,文中录用了某些文献的部分内容和参数,在此对这些文献的作者表示衷心感谢!

作者

1997年5月

主要符号与单位

A —建筑物基础总面积 (m^2)	G —基础结构自重设计值 (kN)
A_c —一根桩承担的处理面积 (m^2)	H —挡土墙高度 (m)
A_p —桩身截面积 (m^2)	h —土层厚度 (m)
A_z —桩群实体基础面积 (m^2)	I_L —土的液性指标 (%)
a —柱距 (m)	I_p —土的塑性指标 (%)
B —建筑物基础总宽度 (m)	K_a —主动土压力系数
C_u —天然土的不排水抗剪强度 (kPa)	K'_a —地震主动土压力系数
c —土壤的粘聚力 (kPa)	K_b —被动土压力系数
d —建筑物的基础埋深 (m)	K'_b —地震被动土压力系数
d —桩径 (m)	K_o —静止土压力系数
E_a —主动土压力 (kN)	K_d —地震系数
E_b —被动土压力 (kN)	K_s —挡土墙抗滑稳定安全系数
E_o —静止土压力 (kN)	K_t —挡土墙抗倾稳定安全系数
E_p —桩体的压缩模量 (MPa)	L —建筑物基础总长度 (m)
E_{ps} —实体基础压缩模量 (MPa)	l —桩长 (m)
E_s —桩间土的压缩模量 (MPa)	m —灰土的面积置换率 (%)
E_v —桩体的变形模量 (MPa)	N —作用在基础上的土重标准值 (kN)
e —土的孔隙比	n_0 —桩土应力分担比
F —上部结构作用在基础上的竖直荷载 (kN)	P —集中外荷载 (kN)
f —天然地基承载力设计值 (kPa)	p —建筑物基础底面的平均压力 (kPa)
f_k —天然地基承载力标准值 (kPa)	p_c —桩体承担的压力 (kPa)
f_s —实体基础桩间土承载力标准值 (kPa)	p_s —桩间土承载的压力 (kPa)
f_u —实体基础顶部边沿土层的天然承载力标准值 (kPa)	p_n —上部荷载产生的基础底面压力设计值 (kPa)
f_{ck} —复合地基承载力标准值 (kPa)	p_t —基础底面处土的自重压力标准值 (kPa)
f_{zk} —复合地基实际承载力计算值 (kPa)	p_w —下卧层顶面处的压力设计值 (kPa)

p_z —由上部荷载引起的下卧层顶面处的附加压力设计值 (kPa)

p_{cz} —下卧层顶面处土及桩的自重压力标准值 (kPa)

p_a —桩端底面的平均压力 (kPa)

p_o —实体基础顶面处的平均压力 (kPa)

p_{oz} —实体基础底面处的附加压力 (kPa)

Q —作用在基础上的总竖直荷载 (kN)

Q_u —桩群的总竖直承载力计算值 (kN)

q —桩体强度计算值 (kPa)

q_u —桩体土无侧限抗压强度极限值 (kPa)

q_s —桩体土的平均摩阻力 (kPa)

q_{uc} —桩体土无侧限抗压强度标准值 (kPa)

q_{cu} —桩群体边缘土的侧阻力标准值 (kPa)

q_{su} —土层的侧阻力极限值 (kPa)

q_{ut} —天然土层的无侧限抗压强度标准值 (kPa)

q_l —桩体土的抗拉强度 (kPa)

R_k —单桩竖直承载力标准值 (kN)

S —桩周长度 (m)

S_r —土的饱和度 (%)

s —基地总沉降量 (mm)

s_1 —实体基础沉降量 (mm)

s_2 —桩端下未处理土层的沉降量 (mm)

w —土的含水量 (%)

w_p —塑限含水量 (%)

w_L —液限含水量 (%)

γ —土的天然重度 (容重) (kN/m³)

γ_d —土的干重度 (容重) (kN/m³)

γ_p —土的加权平均重度 (容重) (kN/m³)

γ_s —水的容重 (kN/m³)

γ_z —地震时土壤重度 (容重) (kN/m³)

γ' —土的浮重度 (容重) (kN/m³)

γ_0 —桩体重度 (容重) (kN/m³)

μ —基底土壤对墙底的摩擦系数

μ' —墙体自身的摩擦系数

ξ —应力集中系数

λ —应力减小系数

注：①每一符号仅列出一种常用单位，应用时可依实际情况选用单位。

②少数符号表示不同意义时，以内文的注释为准。

目 录

主要符号与单位	(1)
1 粉喷桩的原理及应用	(1)
1.1 粉喷桩的一般介绍	(1)
1.2 粉喷桩的机理和性质	(3)
1.3 粉喷桩的特点及应用	(7)
2 粉喷桩施工	(12)
2.1 粉喷桩施工设备	(12)
2.2 粉喷桩施工工艺	(15)
2.3 粉喷桩施工布署及应注意的问题	(20)
3 粉喷桩设计	(23)
3.1 粉喷桩设计的方案选择	(23)
3.2 粉喷桩设计所需资料	(25)
3.3 粉喷桩设计应考虑的问题	(28)
3.4 粉喷桩设计方法	(29)
4 粉喷桩加固地基的计算	(35)
4.1 群桩的工作原理	(35)
4.2 基本资料的确定与地基承载力计算	(36)
4.3 单桩承载能力的确定	(40)
4.4 复合地基计算	(43)
4.5 天然地基承载力验算	(47)
4.6 地基总沉降量的计算	(51)
4.7 有关计算的几点说明	(59)
5 粉喷桩护岸墙计算	(60)
5.1 概述	(60)
5.2 土压力的基本计算方法	(60)
5.3 特殊情况的土压力计算	(69)
5.4 地震土压力	(79)
5.5 挡土墙稳定性与应力验算	(82)
6 粉喷桩的质量检测及事故处理	(87)
6.1 粉喷桩的质量要求	(87)
6.2 粉喷桩的质量检测	(87)
6.3 粉喷桩事故处理	(91)

7 粉喷桩设计计算实例..... (93)

 7.1 粉喷桩加固地基设计..... (93)

 7.2 深埋式粉喷桩护岸墙设计 (107)

 7.3 重力式粉喷桩护岸墙设计 (113)

附录

 附录一 平均附加应力系数表..... (120)

 附录二 主动土压力系数 K_a 值 (125)

参考文献..... (133)

1 粉喷桩的原理及应用

1.1 粉喷桩的一般介绍

1.1.1 概述

用“深层搅拌法”加固地基，提高地基的承载能力，已在国内很多著作和规范中有所阐述，广大从事地基设计、处理、研究和施工的工程技术人员都较熟悉。在这些著作和规范中，一般都是讲述以浆液状固化剂实施的深层搅拌，而谈及以粉状固化剂实施的深层搅拌却不多，本书则专门论述以粉体固化剂进行的深层搅拌方法及加固地基的设计与计算。

深层搅拌法加固软土地基，就是在钻孔过程中利用水泥、石灰等材料作为固化剂，使用特制的深层搅拌机械将浆液或粉状固化剂喷入软土地基的深层，经搅拌，使原位土与固化剂均匀混合并发生一系列物理化学反应，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的优质地基。

粉喷桩是“粉体喷射搅拌桩”的简称，具体地说，就是通过专用的喷粉钻孔机械，采用粉体喷射搅拌法，将粉状固化剂喷射于深层软土中，并经充分搅拌混合而成粉喷桩体。因此，它属于深层搅拌法的范畴。

1.1.2 粉喷桩的开发过程

粉体喷射桩于20世纪60年代后期，首先由日本和瑞典分别提出、开发、推广和应用。据参考文献〔5〕记载，1967年瑞典的捷尔德·鲍斯（Kjeld Paus）首先提出粉体喷射搅拌法加固软土技术，1971年进行了第一次现场试验，制成一根用生石灰和软土拌制成的搅拌桩。1974年开始用于工程实际，成桩直径可达500mm，最大加固深为10m~15m。1967年日本也开始研制石灰搅拌施工机械，1974年已将石灰粉体喷射搅拌桩在软土地基加固工程中应用，最大加固深度为10m~30m。

我国于80年代初引入此项技术。1983年初，铁道部第四勘测设计院开始进行粉体喷射搅拌法加固软土地基的试验研究，并与铁道部武汉工程机械研究所合作，于1983年研制出了我国第一台液压步履式深层搅拌喷粉桩机。1984年7月在广东省云浮硫铁矿铁路专用线上应用石灰搅拌桩加固单孔4.5m盖板箱涵的软土地基获得成功，1985年4月通过铁道部部级技术鉴定，建议逐步推广使用。此后，粉喷桩技术率先在我国沿海地区及长江中、下游得到了广泛应用，取得了良好的社会效益和经济效益。

粉喷桩技术由于它具有明显特点，越来越多地被我国广大工程技术人员所认识和接受，使用地域和范围不断扩大，在很多省（市）的工程建设中被采用。例如河南省于1991年引进此项技术，用于信阳机务段六层砖混结构住宅楼工程中，此后迅速得到推

广。短短几年内,省内各设计单位已普遍把粉喷桩技术应用在工程设计中,尤其是郑州、开封、新乡等地下水位较高的地区的房屋建设中,很多采用了粉喷桩加固处理地基的技术。

粉喷桩施工工艺简单,设备购置费用低,操作技术容易掌握,因此施工力量发展非常快,全国很多地区的建筑施工单位组建了粉喷桩施工专业队,无论是设备数量还是人员素质,都达到了一定的水平。

1.1.3 粉喷桩的发展前景

我国地域辽阔,有各种成因的软土层,如沿海地区滨海相沉积土、江河中下游的三角洲相沉积土、湖泊湖相沉积土等,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,压缩系数高,渗透系数小,沉降稳定时间长。由于这类软土承受外荷载的能力很低,如不作处理,是不能用作荷载大的建筑物的地基的,否则将导致地基和建筑物的下沉、倾斜和破坏。但是,在这类软土地区分布着大量的城市、村镇和工业区,根据工业布局和城市发展规划,常需要在这类软土地基上进行建筑,因此必须对这些地基进行处理。

软土地基的处理方法应依实际土质情况而定,通常采用挖除置换、长桩穿越和人工加固等措施。

(1) 挖除置换法:就是把一定厚度的原位土挖除,换回优质素土、砂土、二八灰土、三七灰土或砂砾石土,但要挖除深厚的软土层实属不易,尤其是地下水位较高的情况下,更是困难。况且在一般情况下,本地区缺乏良质土砂,需要从远处运土,不但困难,而且不经济;如遇下雨,无法施工,则影响施工进度。

(2) 长桩穿越法:主要采用混凝土灌注桩、混凝土预制桩或人工挖孔混凝土桩(当条件允许时)穿透软土层,作为建筑物基础。此方法施工技术性强,质量控制难度大,对一般建筑物来说造价过高。

(3) 人工加固法:主要有砂桩、灰桩、土桩、强夯、压力灌浆、深层搅拌等几种。在这些方法中,砂桩、灰桩、土桩都需要挖孔,并且在多数情况下软土难以人工成孔,特别是有地下水时,根本无法做桩;强夯施工振动大,对周围建筑物有影响,故在多数情况下受到限制;灌浆法施工工艺要求严格,易于漏浆,对地面造成一定污染,因此多数情况不易采用;深层搅拌法则是将固化剂注入地基土中,与原位土搅拌混合形成具有一定强度的桩体和复合地基。在深层搅拌法中,固化剂的注入有两种形式,一是浆液灌注,二是粉体喷射。前者由于有漏浆现象,工人操作条件较差,而粉体喷射法以它具有的优点而后来者居上,越来越多地被人们所采用。

总之,粉体喷射加固地基,不但最大限度地利用原位土与固化剂充分混合,形成复合地基,提高承载能力,而且施工简便,成本低廉,无任何不良影响,其发展前景十分乐观。由于我国应用粉体喷射技术时间不长,实践经验不足,技术数据不全面,规范标准尚不完整,有待在今后的实践中不断补充和完善,得到进一步发展。

1.2 粉喷桩的机理和性质

1.2.1 粉喷桩的原理

粉喷桩加固地基，是利用粉体喷射搅拌机械在钻孔过程中，用压缩空气将粉状加固料以雾状喷入被加固的软土中，凭借特别的钻头叶片的旋转，使加固料与原位软土就地强制搅拌混合，加固料吸水后进行一系列的物理化学反应，使软土硬结，形成整体性强、水稳定性好和足够强度的桩体。这种桩体连同桩间土共同形成复合地基。实践证明，这种复合地基承载力比天然软土地基承载力有大幅度提高。

粉喷桩所用的固化剂有水泥、石灰（生石灰、消石灰）、石膏、矿渣等，还可以用粉煤灰和外加剂作掺合料，以节约固化剂。我国目前在实际工程中主要采用水泥和石灰来拌制水泥土桩或石灰土桩。因石灰土桩的性能低于水泥土桩，所以在中高层房屋建设中多采用水泥作为固化剂材料进行地基加固，而普通公路地基的加固可采用石灰作为固化剂材料。

粉喷桩加固地基的机理在于固化剂与原位土充分混合后，由于固化剂吸收周围土层中的水分而发生物理化学反应，使混合桩体凝结硬化，既提高自身的强度，又稳定了桩周围土层，从而使天然的软土地基改变成优质的复合地基，大大提高地基的承载能力。

当采用水泥作为固化剂时，水泥与土层中的水产生水化反应和水解反应，生成氢氧化钙、含水硅酸钙、含水铝酸钙、含水铁铝酸钙等化合物，在水和空气中逐渐硬化；这些化合物中的钙离子再与土粒中的钠钾离子等矿物成分发生交换作用，从而胶结土粒，使土颗粒集合成较大团粒，形成强度较高的水泥土。水泥和土搅拌越充分，混合越均匀，则水泥土结构的离散性越小，地基的总体强度也越高。

当采用生石灰作为固化剂时，石灰在土层中吸水、膨胀、发热和进行一系列化学反应，如离子交换、土微粒凝聚、火山灰反应、碳酸钙反应、固结反应等，从而形成复杂的化合物，这些化合物在水和空气中逐渐硬化，使土颗粒得到牢固结合和加强，促进周围土体固结，从而形成较高强度的石灰土。

对水泥和石灰吸水后产生一系列物理化学反应的详细过程，读者可阅读《地基处理手册》（参考文献〔5〕），本书不再赘述。

1.2.2 粉喷桩的特性

根据前面叙述可知，粉喷桩是水泥或石灰等固化剂与原地基土进行搅拌混合所形成的一种桩体，其自身性质介于刚性桩（混凝土灌注桩、混凝土挖孔桩、混凝土预制桩、预应力钢筋混凝土桩、木桩、钢管桩等）与柔性桩（碎石桩、沙桩、灰土桩、土桩等）之间的一种桩型，它的刚度、抗压强度和抗侧压力作用小于刚性桩而大于柔性桩。由于固化剂是在钻孔过程中喷入土层中的，桩截面中心的钻杆占去一定的空间，钻头叶片愈向端头搅拌力矩愈大，使土层搅拌愈均匀，因此桩身截面的强度是不均匀的，中心轴处强度最低，沿截面径向方向强度由中心轴向外逐渐增强。施工中如进行不喷粉复钻一次以提高混合的均匀程度，则情况会得到好转。

粉喷桩的轴向应力分布也是不均匀的，从桩顶自上而下轴向应力逐渐减小，最大轴

向力位于桩顶3~5倍桩径范围内,此范围以下轴向力收敛很快。也就是说,桩的上部受力较大,摩阻力得到充分发展,桩的下部受力较小,摩阻力则不能充分发展。因此,桩的破坏都发生在上部3~5倍桩径范围内。在复合地基群桩情况下,桩先于桩间土达到受力极限,其桩侧摩阻力的发挥小于对应的单桩,则复合地基中桩的承载力要低于单桩承载力。复合地基承载力的大小取决于桩身刚度和桩体承载力的相互匹配。桩身的承载能力关键在于桩体强度,尤其是浅层桩体强度,这是粉喷桩向下传力的必要条件。

桩的被破坏机理是,以浅层桩身纵向压缩变形增长较快,因此桩体受荷过大时会产生裂缝,使桩身强度遭到破坏,最终达到极限状态而使粉喷桩失去传力功能。

粉喷桩可以完全改变天然软土的性质,大幅度提高桩体承载力,并且桩体抗压强度与土质、含水量、固化料掺入比、土料混合程度和龄期有直接关系,现分述如下:

(1) 土质。固化料对粉土的增强效果远比对淤泥质类土和粘性土的增强效果好,即土粒越粗,增强效果越明显;同时,原位土越纯净,增强效果越好;软土层中有机质含量越高,则增强效果越低。

(2) 含水量。在软土层中,尤其是粘性土中,存在一个最佳含水量问题,即在天然土中的某一个含水量值,对应有一个最佳固化剂掺入比,超过这个界限,则增强效果不明显(表1.1)。

表1.1 含水量与强度的关系

含水量 (%)	天然土	47	62	86	106	125	157
	水泥土 ^①	44	59	76	91	100	126
无侧限抗压强度 ^② q_u (kPa)		2320	2120	1340	730	470	260

注:①水泥掺入比10%;②龄期28d。

(摘自参考文献[5])

(3) 固化料掺入比。试验表明,固化剂掺入比越大,增强效果越好,即桩身强度随加固料掺入比的增加而增加。一般说,天然土的含水量高时,其固化剂掺入量越多;反之,含水量低时,其掺入量应适当减少。从经济观点出发,应通过试验,选择含水量一定时的最佳掺灰量作为设计掺入比。

(4) 土料混合程度。加固土的强度与土料混合程度亦有密切关系;灰土搅拌越均匀,其改善原状土的效果越好,得到的桩体抗压强度也越高。

(5) 龄期。水泥土或石灰土的强度随养护龄期的延长而增大,详见表1.2及表1.3。在28d内,强度增长最显著,尤其在头7d,强度急剧提高,一般可达28d强度的60%左右,可达90d强度的35%~50%;28d后强度仍有明显增长,90d后强度增长缓慢。因此,粉喷桩的无侧限抗压强度的标准值是以90d龄期的强度值作为强度指标的。

从受力情况看,粉喷桩主要是提高复合地基的承载力,但又不能采用通过配置钢筋的方法来提高自身的承载能力,因此,它仅考虑竖直荷载的作用,而不像混凝土桩那样,在承受竖直力的同时,还有可能承受水平力。当然,在粉喷桩用于岸坡稳定时,它将主要承受水平推力,但由于粉喷桩不能承受较大的弯矩和拉力,此时水平力将依据较大的反力来平衡,而不是靠桩体自身强度来抵抗。

表 1.2 加石灰后土的无侧限抗压强度

项 目	原状土	下列养护期时的灰土		
		7d	28d	90d
无侧限抗压强度值 q_u (kPa)	27	454	785	1309

注：广东腰古云浮硫铁矿试验资料。

表 1.3 灰土的抗剪强度指标

龄 期	天然地基	7d	28d	90d
c (kPa)	8	101	178	330
φ (°)	7°41'	41°59'	38°56'	35°45'

注：土样取自广东腰古云浮硫铁矿专用线。

按粉喷桩作用特点分析，它是摩擦桩与端承桩的统一结合，计算时既要考虑它的端承作用，又要考虑它的摩擦作用。因为在软土层中，天然地基的承载力一般都较低，极少存在适合端承桩的高承载力地层，同时粉喷桩长有一定限度，也不可能靠桩周摩擦获得足够的摩阻力。因此，在设计粉喷桩时，总是选择一个天然承载力相对较高的软土层作为桩端持力层，计算单桩竖向承载力时，同时计入端阻力和桩周摩阻力的作用。

1.2.3 固化剂掺入量及其效果

固化剂掺入量应依据加固料类别、原位土土质情况、天然土含水量、天然地基承载力及要求的桩体强度和复合地基承载力等条件，通过室内试验确定。并可根据早强、缓凝、减水、节约加固料等原则选用外掺剂。

固化剂掺入量是以掺入比 μ_p 表示的，掺入比系指固化剂的掺入重量与被加固的软土重量之比，按下式表示：

$$\mu_p (\%) = \frac{\text{掺加的固化料重量}}{\text{被加固的软土重量}} \times 100\%$$

当用水泥作固化料时，其水泥品种和标号可以是多样的，如普通硅酸盐水泥、矿渣水泥、火山灰水泥及其他特种水泥均可作为掺入料，为了增大掺入效果，多用较高标号的水泥。一般情况下，工程中常用 425[#] 水泥作为加固料；当对桩身强度要求较高时，以及用于护岸工程和防渗工程时，宜选用 525[#] 水泥作为加固料。

资料表明，每种土质都存在一个经济掺灰量，也就是在最佳含水量情况下所获得最高桩体强度时的掺灰量。一般情况下掺灰量随含水量增大而增加，但超过某一含水量时，增加掺灰量所得到的强度增高值极小，此时掺灰量就应该加以限制，以达到最经济的效果。通常含水量高时，含灰量可取 10%～15%；含水量低时，含灰量可取 6%～10%，而《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—91) 中规定，固化剂掺入量为被加固土重的 7%～15%。实际工程中应通过制备多组灰土试件，经养生后试压决定。对于无条件做掺入比试验的工程，在 500mm 桩径情况下，每延米的常用掺灰量为 30kg～50kg。

由于水泥和石灰粉的自身重量为 12kN/m³～14kN/m³，稍轻于天然软土，且加入量不大，所以掺过固化剂的水泥土和石灰土的容重与软土相比较为接近，但混合后的桩体

土比天然软土要密实一些，所以它的容重比天然土层稍大（表 1.4）。

表 1.4 水泥土的容重试验结果

（引自冶金部建筑研究总院地基室，1985）

软土天然容重 γ (kN/m ³)	水泥掺入比 μ_p (%)	水泥土的容重 γ_0 (kN/m ³)	$\frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma} \times 100\%$
17.1	5	17.3	1.1%
	15	17.5	2.3%
	25	17.6	2.9%
17.5	7	17.6	0.6%
	15	17.8	1.7%
	20	17.8	1.7%

固化剂掺入后的改善土，其效果非常明显。据浆液喷射深层搅拌法资料证明，水泥土的无侧限抗压强度 q_u 一般为 300kPa~4000kPa，其抗拉强度 q_t 及抗剪强度指标 c 和 φ 都随抗压强度的增加而提高。在上述 q_u 的范围内，相应的抗拉强度 q_t 为 100kPa~700kPa，粘聚力 c 为 100kPa~1100kPa，即 $q_t = (0.15 \sim 0.25) q_u$ ， $c = (0.2 \sim 0.3) q_u$ ，其内摩擦角 $\varphi = 20^\circ \sim 30^\circ$ 。

粉体喷射深层搅拌所成的改善土较液体喷射深层搅拌所得的改善土的强度会低一些，依参考文献 [10] 所示，在淤泥质粘土层中的粉喷桩无侧限抗压强度达 2350kPa~3720kPa，在砂质粘土层中的粉喷桩无侧限抗压强度可达 4630kPa 以上。表 1.2 和表 1.3 资料表明，粉体喷射石灰土的无侧限抗压强度 q_u 为 1309kPa，抗剪强度指标也较高，粘聚力 c 值可达 330kPa，内摩擦角 φ 为 $35^\circ 45'$ 。

水泥土的变形模量和压缩模量与抗压强度也有直接关系，当水泥土的 q_u 为 300kPa~4000kPa 时，变形模量 $E_v = 40\text{MPa} \sim 600\text{MPa}$ ，为抗压强度 q_u 的 120~150 倍，压缩模量 $E_p = 60\text{MPa} \sim 100\text{MPa}$ ，水泥土及石灰土的变形模量和压缩系数分别见表 1.5 和 1.6。

表 1.5 水泥土的变形模量

（引自冶金部建筑研究总院地基室，1985）

试件编号	无侧限抗压强度 q_u (kPa)	破坏应变 ϵ_f (%)	变形模量 E_{50} (kPa)	$\frac{E_{50}}{q_u}$
1	274	0.80	37000	135
2	482	1.15	63400	131
3	524	0.95	74800	142
4	1093	0.90	165700	151
5	1554	1.00	191800	123
6	1651	0.90	223500	135
7	2008	1.15	285700	142
8	2393	1.20	291800	121
9	2513	1.20	330600	131
10	3036	0.90	474300	156
11	3450	1.00	420700	121
12	3518	0.80	541200	153

注：表中 E_{50} 表示水泥土的应力达到破坏值的 50% 时的变形模量。

软土中加入石灰粉后效果同样显著。据试验资料表明, 加石灰后的液性指数 I_L 随着含灰量的增加呈线性递减。当制备土含水量小于 50% 时, 加灰后的液性指数 I_L 很快小于零, 而使原状软土从流塑性状态进入半固态或固态, 其强度也有较大提高。

表 1.6 压力 $p = 100\text{kPa} \sim 300\text{kPa}$ 加石灰后灰土的压缩系数 α_v 及侧限变形模量 E_v

	天然地基	7 d 龄期	28 d 龄期	90 d 龄期
$\alpha_v \text{ (kPa)}^{-1}$	0.0006	0.00007	0.00007	0.00005
$E_v \text{ (kPa)}$	3200	27400	27400	37700

注: 土样取自广东腰古云浮硫铁矿专用线。

在一定稳定压力下对试件进行加压试验表明, 灰土的压缩量随石灰粉含量的增加呈线性递减, 当加灰量为 15% 时, 在 300kPa 稳定压力下, 其压缩量减少近 3 倍。

加灰后软土的压缩系数减小, 而侧限变形模量加大, 无侧限抗压强度随含灰量和龄期的增大而提高。

天然地基经石灰搅拌加固后, 不但石灰桩体自身的强度有较大提高, 同时桩间土的性能也随之改善, 其强度也得到提高 (表 1.7)。

表 1.7 加固前后土性的变化

项 目	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ	无侧限抗压强度 q_u (kPa)	含水量 w (%)
土 样				
加固前的土	8	$7^\circ 41'$	27	39.2
加固后的柱间土	27	$13^\circ 23'$	46	30.0

养生后的粉喷桩体, 其单桩承载力可达 250kN, 加固后的复合地基承载力可比原土提高 1.0~1.5 倍, 达 200kPa 以上。

1.3 粉喷桩的特点及应用

1.3.1 粉喷桩的特点

粉喷桩具有加固工艺合理、施工简单、技术可靠、成本低廉、进度快、无振动、无噪音、工期短、占地面积小、对环境无污染、对周围建筑物无影响、加固效果良好等特点, 因此得到广泛应用。尤其以下特点, 更引起人们注意:

(1) 可以直接在含有地下水的地层中施工制桩, 避免了水下施工的麻烦, 大大简化了施工程序; 施工期短, 节约工程投资。

(2) 虽然负温下固化料与土的反应减弱, 但温度回升后, 反应可继续进行, 故在地温为 -10°C 以上的情况下进行施工制桩, 毫不影响桩的质量, 因此可以在低温时不间断施工。除雨雪天气外, 施工几乎不受季节影响。

(3) 制桩过程中仅向土层中喷射干粉, 无需向地层中注入附加水分, 不但减少了施工地面的污染, 而且使固化剂能充分吸收软土中的水分, 从而增强加固效果。

(4) 制桩原料除原位软土外，仅掺入少量的固化剂，因此施工工艺十分简单，制桩成本很低。

1.3.2 粉喷桩的应用

粉喷桩的形成属于深层搅拌法，适用于有地下水或含水量大于 23% 的粘性土、粉土、砂土、粉砂土、粉质粘土、淤泥等各类软土地层中，而不适用于含有石块、树根、有机物的人工填土层。粉喷桩的制桩过程只将粉状固化料喷入软土层中与原位土搅拌混合，而不是喷射浆液固化剂与原位土混合。

粉体喷射搅拌桩可用来解决：①增加软土地基承载力；②减小软土地基的不均匀沉陷和总沉陷量；③增加土质岸边的稳定；④在沟槽和基坑开挖中代替板桩支护；⑤减小或阻止地下水的渗透等问题。

根据粉喷桩所能解决的问题，我们可以将粉喷桩的应用范围归纳为三种类型：

(一) 用以加固软土地基

粉喷桩加固地基，主要是利用群桩的作用原理，使之提高房屋工程、港口码头、公路桥涵、挡土墙、油罐等建筑物的地基承载力。

根据建筑物基础型式的要求，粉喷桩可以满堂布置，如筏板式房屋基础、公路基础、罐体基础等；也可以带状布置，如条形房屋基础、挡土墙基础等；还可以块状布置，如独立柱基础、桥墩基础等布孔形式（图 1.1）。不论何种布置方式，其桩位排列均可采用三角形、正方形、长方形或梅花形，桩距 a 由计算决定（图 1.2）。

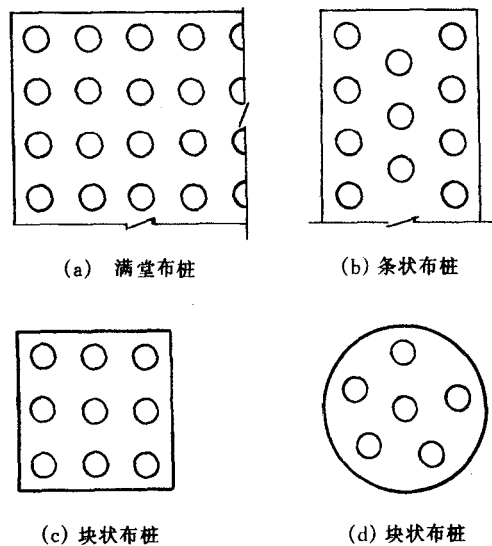


图 1.1 粉喷桩布孔形式图

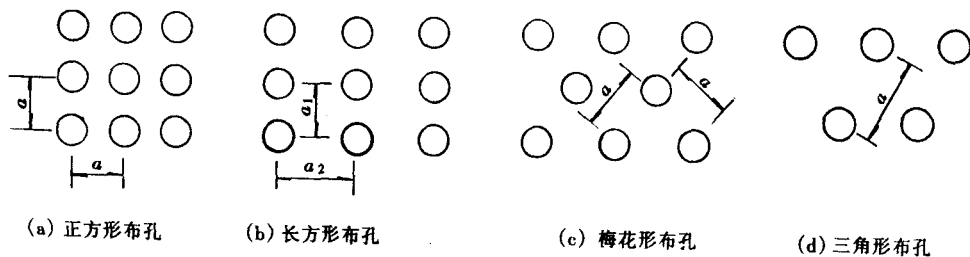


图 1.2 粉喷桩桩位排列图

孔深应依成孔机械性能、要求的地基承载力和原土持力层埋深综合考虑。目前，河南地区所用的喷粉桩机，钻孔深度都在 14m 以内，通常孔深都不超过 12m。在此深度内，应选择土质均匀、地耐力比较高的土层作持力层，并且桩底深入持力层的深度不得小于 50cm，对持力层顶面起伏较大的土层，应增大桩底深度，以保证桩端全部进入持力层。