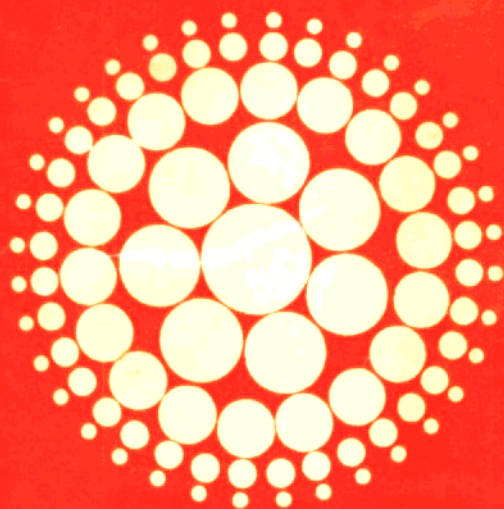


水利电力系统领导

干部岗位培训教材

火电施工现代技术

武汉水利电力学院 主编



河海大学出版社

火电施工现代技术

武汉水利电力学院主编

河海大学出版社

编写说明

为了适应水利电力系统大中型企业领导干部岗位职务培训工作的开展，部教育司、生产司、基建司组织了部分有专长的教授、讲师和专业科技干部，编写了一套体现水利电力行业特点的领导干部岗位培训教材，共有十四本，书名是《电力企业管理》、《电力生产企业现代管理》、《电力生产企业现代管理案例》、《电力生产现代技术（电网部分）》、《电力生产现代技术（供电部分）》、《电力生产现代技术（火电厂部分）》、《电力生产现代技术（水电厂部分）》、《电力建设现代管理》、《电力施工企业管理》、《火电施工现代技术》、《送变电施工现代技术》、《水电施工企业现代管理》、《水电施工企业经营管理》、《水电施工现代技术》。

这套教材主要是供给水利电力系统大中型企业局厂长（经理）、党委书记、总工程师、总经济师、总会计师岗位培训时使用，也可供其它经济管理干部和科技干部的岗位培训和高等院校有关专业选用。

由于经验不足，编写时间又很仓促，再加上当前水利电力企业正处在改革之中，一些问题正在研究探索，而且新的技术又在不断发展，因此，书中一定会存在着不完善或者欠妥之处，望读者批评指正。

水利电力部教育司

1988年3月

前 言

《火电施工现代技术》一书，是在原水利电力部教育司和基建司的组织和大力支持下，按照水利电力系统大中型企业领导干部岗位培训的教学要求编写的。本书初稿经武汉水利电力学院举办的两期火电施工企业总工程师岗位培训班试用，并在广泛征求学员意见的基础上，作了较大的调整和修改，才最后成书。

全书汇集了十个独立的专题，分列为两篇。第一篇为土建部分，重点介绍土建施工中的地基基础处理技术、混凝土外加剂、粉煤灰及其利用和泵送混凝土施工等内容；第二篇为机炉部分，主要介绍液压提升装置、无损检测、小口径管自动焊、微机分散控制系统、现代锅炉的化学清洗以及大型机组运行和调试等内容。本书力求反映国内外火电施工中的有关先进技术和实践经验，使之具有实用性和针对性，并对基础理论进行了阐述；同时引入了大量科学研究成果和生产实际资料。

本书采用国际单位制，考虑到目前工程实际中在某些方面还沿用工程单位制，因此，在本书个别专题中，凡涉及这两种单位制，则将工程单位制放在圆括号内。

本书除作为火电施工企业总工程师岗位培训的教材外，还可作为水利电力部门及其他有关部门的工程技术人员学习用书，以及高等院校有关专业的教学参考书。

参加本书编写和审稿的有：

第一专题由刘祖德、刘一亮编写，冯国栋审稿；

第二专题由李亚杰编写，李鸿恩审稿；

第三专题由方坤河编写，王国欣审稿；

第四专题由颜其照编写，梁润审稿；

第五专题由张晓鲁、俞仲华编写，唐兴林审稿；

第六专题由毛森祥编写，孟传亨审稿；

第七专题由王大麟编写，章应霖审稿；

第八专题由张鑫编写，陈石良审稿；

第九专题由彭珂如编写，肖作善审稿；

第十专题由唐必光、朱自庄、陈汝庆编写，陈家玠、陈信桐审稿。

全书由李廷孝、毛森祥负责组织和统稿。

参加本书编写的张晓鲁和俞仲华是能源部电力建设研究所的，其余的编者和统稿人均均为武汉水利电力学院的教师。

能源部电力建设研究所唐兴林高级工程师、湖北省电力试验研究所陈家玠、陈信桐和孟传亨高级工程师以及武汉水利电力学院有关教授分别对书稿作了详细审阅，并提出了许多宝贵意见，谨向上述同志和单位表示衷心感谢。

此外，本书在编写过程中引用了兄弟院校和科研、生产单位的有关研究成果和实际资料，在此对这些兄弟单位一并表示感谢。

由于我们水平有限，新的技术又在不断发展，书中难免有不足或错漏之处，竭诚欢迎广大读者批评指正。

编 者

一九八八年十月

第一专题 地基基础处理技术

随着经济建设的蓬勃发展,国家对电力事业的需求极为迫切。火力发电是电能的主要来源。当前火电厂建设不但装机容量越来越大,而且新建的厂址所遇到的地质条件也越来越复杂。机组越大,对地基要求越高。坑口电站复杂的工程地质条件给工程带来困难,滨江湖泊及沿海的软土地基无法满足变形及稳定性要求。地震可能使饱和砂基产生液化而造成工程巨大破坏。因此,厂房及机组通常需要采取特殊类型的基础(如深基础),或者对地基进行必要的加固处理才能满足结构及运行的要求。当前,常采用表1-1中所列举的方法对地基进行加固处理以增大地基的承载力,减少其变形量和变形差。

桩基础是工程中最常用的一种深基础。目前不但桩基础的型式及其施工方法已有较大的改进,其计算理论也日趋成熟。

由于篇幅所限,本专题仅介绍旋喷注浆加固法、强夯加固法、地震区地基液化以及桩基础等有关内容,其他加固方法可参阅地基基础的有关教材。

表1-1

地基加固处理常用方法

处 理 方 法		加 固 原 理 及 主 要 作 用	适 用 范 围
夯 实 及 碾 压 法	重锤夯实法	利用重锤夯实功能使地基挤密	浅层含水量较低、地下水位低的土质
	强夯法	利用高冲击功能使基土压密或液化,触变后变密	透水性较大的地基或杂填土,加固影响深度较大
	机械碾压法	利用碾压机械的自重对地基碾压增密	非饱和土质,加固深度较浅
挤 密 法	挤密砂桩法	在松软地基中打入砂桩使其挤密或成复合地基	松砂、粉砂或含粘粒量不高的地基
	振冲碎石桩	水力喷射及振冲头振动成孔,填入碎石并振实成桩,使其构成复合地基	含粘粒量少、不排水抗剪强度不 低于20kPa的地基

续表1—1

处 理 方 法		加 固 原 理 及 主 要 作 用	适 用 范 围
预 压 法	排水预压法	通过井点（或排水纸板、砂井）排水，降低地下水位，依靠自重增大而预压	透水性较大或有夹砂层地基
	堆载预压法	建筑物建造或使用前对地基堆载预压	固结系数较大、压缩层较薄的地基
	砂井堆载预压法	堆载并通过砂井加速排水预压加固	加固深度较大、固结系数较小的地基
换土垫层法		用强度较高的砂、碎石等材料更换基底下软弱土层，使持力层承载力提高，减少变形量，改善排水条件加速固结	浅层、荷载较小的建筑物地基
胶 结 法	电化加固法	地基中注入化学浆液，在电场作用下胶结加固地基	软 土 深 层 加 固
	深层搅拌法	通过搅拌机械使水泥浆液（或石灰粉）与软粘土搅拌、固化胶结成桩	
	旋喷注浆加固法	通过旋喷机械在软土中高压喷射水泥浆液使土与之结合、胶结固化成桩	
反压法		在路堤、建筑物基础周围堆加反压荷载，防止地基滑动挤出	对变形要求较低的建筑基础
土工合成物加固法		在地基或土工建筑物中埋置纤维织物或金属材料，利用它们良好的抗拉强度、柔性及其与土体共同作用，以提高地基及土体的抗滑能力，或用于防止渗透破坏	对变形要求较低的建筑基础、加固土坡、作反滤体

第一节 旋喷注浆加固法

一、概述

旋喷注浆加固法（简称旋喷法）是一种较新的地基处理方法。它是通过高压发生装置使液流获得巨大能量后，经过注浆管道从一定形状和孔径的喷嘴里，以很高的速度喷射出来，形成一股能量高度集中的液流直接冲击破坏土体，并使浆液与土搅拌混合，在土中凝固形成一个具有特殊结构的固结体，从而使地基得到加固。

旋喷法是在静压注浆法基础上发展起来的，它克服了静压注浆法中由于地基土的不均匀性、浆液流动方向和加固范围难以控制，以及对渗透性小的粘性土或淤泥不能达到理想效果等方面的缺点。此法可采用旋转喷射（简称旋喷）和定向喷射（简称定喷）两种注浆形式来进行加固。旋转喷射时，喷嘴一面喷射，一面旋转和提升，可以控制加固范围，使其形成具有一定间距（或连成一片）的柱状固结体。柱状固结体可成垂直的也可成水平或倾斜的。定向喷射时，喷嘴一面喷射，一面提升，喷射方向固定不变，最后形成壁状的固结体。

旋喷法基本工艺有三种：

1、单管旋喷法 该法是利用钻机等设备，把安装在注浆管底部侧面的特殊喷嘴置入土层到预定深度后，用高压泥浆泵等高压发生装置，以20MPa左右的压力，将浆液从喷嘴中喷射出，用以冲击破坏土体。同时借助注浆管的旋转和提升，使浆液与受破坏的土体颗粒混合。经过一定时间凝固，便在土中形成一个圆柱状的固结体（图1—1）。

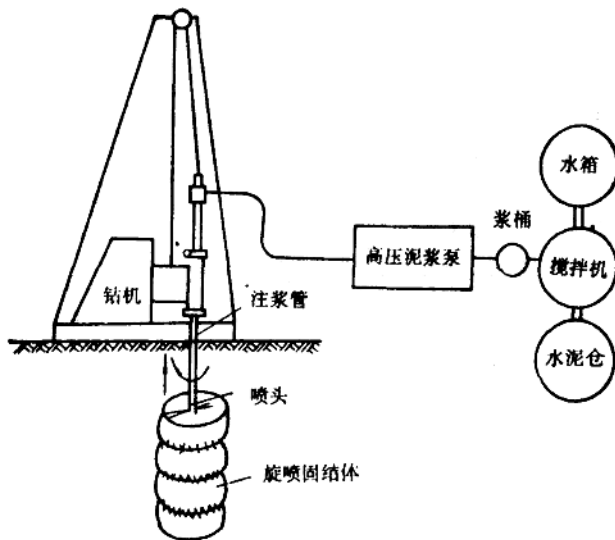


图1—1 单管旋喷法示意图

2、二重管旋喷法 该法是使用双通道的二重注浆管，将管置入到预定深度的土层中，通过在管底部侧面的一个同轴双重喷嘴同时喷射出高压浆液和空气两种介质的喷射流，用以冲击破坏土体。高压泥浆泵将浆液以40MPa左右的压力从内喷嘴中高速喷出，同时将压缩空气用0.7MPa左右的压力从外喷嘴喷出。在高压浆液流和它外围绕气流的共同作用下，破坏土体的能量显著增大。喷嘴一面喷射，一面提升，最后在土中形成柱状固结体，其直径明显增大（图1—2）。

3、三重管旋喷法 该法是使用水、气和浆液三管同轴的注浆管，以高压泵将20MPa左右的高压水流喷射，并在其周围同时射出一股0.7MPa左右的圆筒状气流，它们同轴喷射冲击土体，形成较大的空隙。再由泥浆泵注入压力为2~5 MPa的浆液填充、边喷射边旋转和提升，最后在土中形成一直径更大的圆柱状固结体（图1—3）。

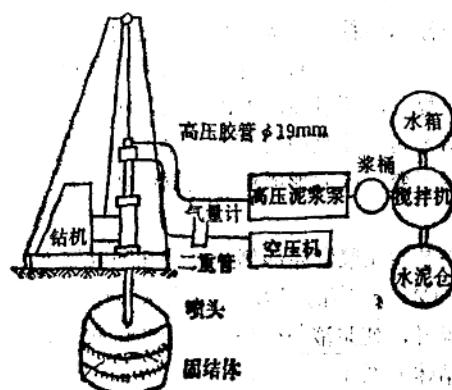


图1—2 二重管旋喷法示意图

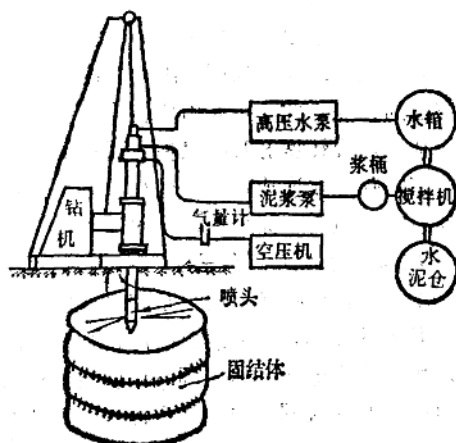


图1—3 三重管旋喷法示意图

二、旋喷法加固效果及适用范围

用旋喷法加固，浆液和周围土颗粒搅拌混合并胶结成特殊结构的固结体。由于固结体强度比原土体大大提高（粘性土固结体单轴抗压强度最大值可达5~10MPa，砂类土最高可达10~20MPa），用以加固持力层（图1—4），不但可使地基承载力提高，而且改善了基土变形特性，大大减少地基沉降量和不均匀沉降。如果加固后连成帷幕式的固结体，它的渗透性大大降低（可低于 10^{-6}cm/s ），可以用它作为防渗帷幕（图1—5）及防止流砂产生，保证

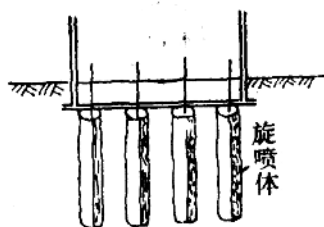


图1—4 加固持力层

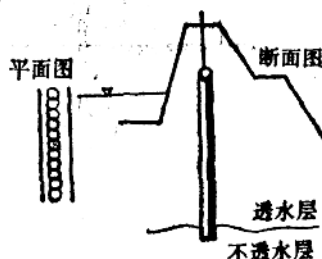


图1—5 坝基防渗



图 1—6 防护邻近构筑物

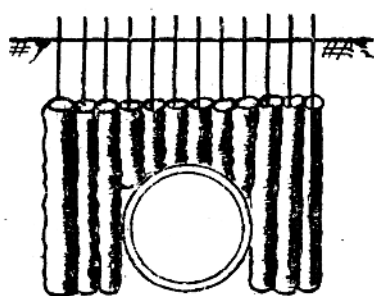


图 1—7 地下工程护壁

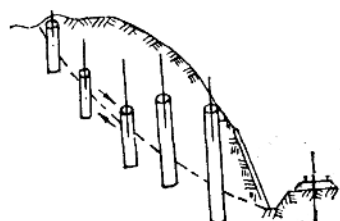


图 1—8 防止土坡滑动

基坑开挖，防护邻近老建筑物（图 1—6）。固结体有良好的抗剪性能，它也是地下工程的良好护壁（图 1—7）和防止土坡滑动的理想阻滑体（图 1—8）。此外，它还可作为锚固基础、反挡基础以及用于减少设备基础的振动，防止地基的振动液化。

旋喷注浆法加固主要适用于第四纪的冲（洪）积土层、人工填土等软弱地基。实践证明，砂类土、粘性土、黄土和淤泥都能进行旋喷加固，一般效果良好。但对于砾石地基或含有大量纤维质的腐植质地基，旋喷加固质量得不到保证，这类土旋喷注浆法加固效果不如静压注浆法。

旋喷注浆法加固有如下优点：

- 1、适用于多种工程加固要求。它不但适用于新建筑物地基各种加固，而且适用于老建筑物的地基加固。
- 2、固结体形状可以控制。施工时通过调整旋转速度和提升速度，增减喷射压力或更换喷嘴孔径来改变浆液流量以控制固结体形状，使其满足各种不同的加固要求。
- 3、加固后固结体直径大。单管法注浆后固结体直径一般为 $0.4\sim 0.8\text{m}$ 。三重管加固后固结体直径可达 $0.8\sim 3.0\text{m}$ （国外最大可达 4.0m ）。
- 4、加固深度大（国外最大加固深度已达 70m ），且能根据土层要求加以控制，还可根据软弱土层的位置进行局部加固。
- 5、固结体重量轻。固结体内部的土粒较少并含有一定量的气泡，其密度小于或接近原状土体，加固后不会增加地基的附加荷载。
- 6、施工设备简单，安全方便，无公害。

基于上述优点,旋喷注浆法加固目前已在建筑工程、冶金、铁路、桥梁、港工等部门广泛应用。

三、旋喷注浆法加固原理

(一) 高压喷射流及其作用

1、高压高速喷射流的产生

旋喷注浆时,高压喷射流的形态、结构及喷射速度对加固地基的质量起着关键性作用。

当前我国旋喷注浆使用的压力为20MPa。高压喷射流是从2~8mm的喷嘴孔中喷射出来的,因此喷射流具有压力高、流速快和能量大的特点。高压水经过喷嘴形成高速水流,其能量形式由压能变为动能。高压水射流的速度可按下式计算

$$V_0 = \varphi \sqrt{2g \frac{P}{\gamma}} \quad (1-1)$$

经变换得

$$\varphi^2 P = \frac{\gamma V_0^2}{2g} = P \quad (1-2)$$

式中 V_0 ——喷嘴出口流速, m/s;

φ ——喷嘴入口压力, Pa;

p_0 ——喷嘴出口压力, Pa;

γ ——水的重度, N/m³;

g ——重力加速度, 取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;

φ ——喷嘴流速系数, 良好的圆锥形喷嘴 $\varphi \approx 0.97$

高压水喷嘴射流的流量可按式计算

$$Q = \mu F_0 V_0 = \mu F_0 \varphi \sqrt{2g \frac{P}{\gamma}} \quad (1-3)$$

式中 μ ——流量系数, 圆锥形喷嘴 $\mu \approx 0.95$;

F_0 ——喷嘴出口面积, m²;

Q ——流量, m³/s。

在高压高速条件下, 喷射流具有很大的功率, 其值为

$$N = pQ \quad (1-4)$$

将式(1-3)代入式(1-4), 经单位换算得

$$N = \frac{8 P^{\frac{3}{2}}}{2d_0^{\frac{3}{2}} \times 10^{-5}} \quad (1-5)$$

式中 N ——喷射流的功率, kW;

d_0 ——喷嘴直径, cm;

p ——泵压, MPa;

如果喷射流的压力分别为10、20、30、40和50MPa, 喷嘴出口孔径为8mm, 则它们的射流速度和功率见表1-2。

表 1-2

射流的速度与功率

喷嘴压力 (MPa)	喷嘴出口孔径 d_0 (cm)	流速系数 φ	流量系数 μ	射流速度 V_0 (m/s)	喷射功率 N (kW)
10	0.30	0.963	0.946	136	8.5
20	0.30	0.963	0.946	192	24.1
30	0.30	0.963	0.946	243	44.4
40	0.30	0.963	0.946	280	68.3
50	0.30	0.963	0.946	313	95.4

注：流量系数和流速系数为收敛圆锥 $13^\circ 24'$ 角喷嘴的水力试验值。

从表中看出，出口孔径虽然只有 3 mm，然而由于喷射压力大，喷射流速很高，携带的能量也就很大。

2、高压喷射流的作用

高压喷射流高速喷射土体，土体受到冲切破坏作用。其机理可归纳为以下几个方面：

(1) 喷射动压作用 高压喷射流冲击土体时，由于能量高度集中地冲击一个很小的区域，因而这区域及其周围土体受到很大的动压应力作用，当它超过土体颗粒结构联结强度时，土体便受到破坏。

由喷射流的运动方程得出理论破坏力为

$$F = \rho A V_m^2 \quad (1-6)$$

式中 F ——喷射流的破坏力，N；

ρ ——喷射流介质的密度， $N \cdot S^2/m^4$ ；

A ——喷射流的截面积（喷嘴出口）， m^2 ；

V_m ——喷射流的速度， m/s 。

由式(1-6)可知，喷射流破坏力和流速的平方成正比。增大喷射压力，加大流速，便可增大射流的破坏力。

(2) 喷射流的脉动负荷 高压旋喷所采用的高压发生装置是往复式高压泵，旋喷时射流存在着脉动现象。当土体不停地受到此射流的冲击，土粒表面受到脉动负荷的影响，残余变形逐渐积累，使土粒失去平衡而促使土体破坏。

(3) 水楔效应 土体在上述两种喷射效应作用下，土体内部最薄弱部位产生裂隙或孔洞，喷射流随即楔入这些裂隙或孔洞并使其扩展，从而剥蚀或冲刷带走其中细小颗粒。

(4) 气流搅动 二重管或三重管喷射时，水或浆液与空气同轴喷射到土体中，空气流使水或浆液的喷射流在受到破坏的土体中迅速吹散，增大破坏作用。

(二) 旋喷成桩

旋喷时，从喷嘴中喷射出来的高压液流处于高速运动状态，土体中一部分介质（包括细小颗粒）被高速液流卷吸带走，喷射流边界形成低压区，该区周围介质随之产生垂直于射流方向的运动。这不但是喷射流中冲切破坏土体的过程，也是浆液和土粒同时搅拌混合的过程。

旋喷后，土体孔隙被水泥浆液所充填，土颗粒被水泥浆所包裹。水泥水化过程中，在土颗粒的周围形成了各种水化物结晶体，并且不断地生长、延伸，特别是水泥在这个过程中形成的钙矾石针状结晶很快地交织在一起形成空间的网络结构，土颗粒成为这种结构的骨架。水化完成后，土中自由水减少，旋喷体就成为有很大强度的水泥——土粒骨架结构的固结体。这种固结体在电子显微镜中可看到，土颗粒周围充满着密集的水泥水化后的结晶体。

旋喷注浆加固的固结体大小取决于浆液喷射距离以及浆液向外挤压或渗透的影响范围。浆液在其影响范围之内随时间增长而逐渐硬结固化。在被加固的柱状固结体中，靠近喷嘴口的部分，细小颗粒被冲刷带走后，就为浆液所取代。随着喷射流能量沿流程的延伸而减弱，固结体横断面上土粒按质量大小有规律地排列起来（图1—9）。

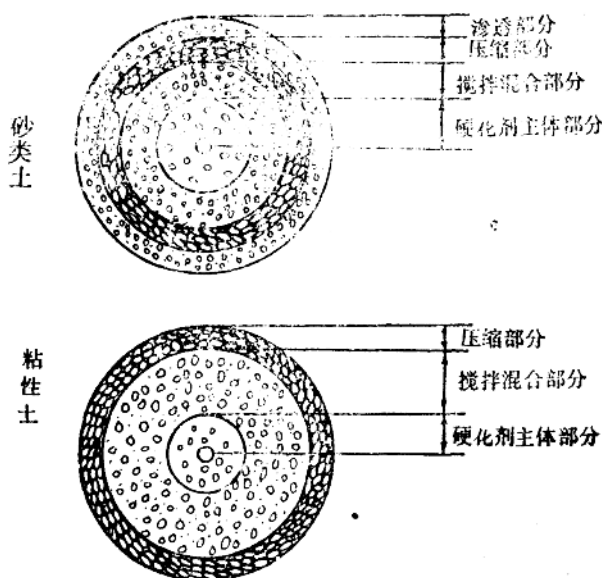


图1—9 旋喷体最终固结示意图

对粒径较大的砾石或腐植土，旋喷固结机理不同于粘性土和砂类土。在砾石土中，射流不能使体大量重的颗粒切削或使其重新排列，浆液只能通过其空隙向四周挤压，其机理接近于渗透理论的机理，最后同颗粒胶结为柱状固结体。对腐植土层，旋喷固结体的形状及其性状受植物纤维的粗细及长短、土中含水量和土颗粒的多少的影响。含纤维量少者，加固受影响小。反之，对纤维粗长而数量多的腐植土，因纤维有弹性，切削困难，浆液流动受影响，加固效果差。

四、旋喷加固法设计

（一）设计前必备的资料

1、被加固土层的组成，各层土颗粒级配及物理力学性能，土层的结构情况等工程地质情况。

2、土层中地下水位，地下水活动情况，地下水的酸碱性以及土层的渗透系数等水文地质资料。

3、各土层的标准贯入击数(N)。当N大于30的各种土层或粒径大的砂砾层以及腐植土，加固效果保证率较低。

4、机具条件及类型。

5、地形、地貌、运输及水电供应条件。

(二) 旋喷注浆材料

1、注浆材料要求

(1) 可喷性要求 旋喷浆液需通过细小孔径的喷嘴喷出，故浆液应有较好的可喷性。浆液的稠度过大，可喷性差，往往导致喷嘴及管道堵塞，同时加快高压泵的磨损。

浆液的可喷性可用流动度或粘度来评定。流动度用图1—10所示的圆锥筒试验测定。试验时，将浆液均匀搅拌3分钟后，立即注入置于水平玻璃板上的锥筒内并刮平。然后将锥体迅速垂直提起，浆液即自然流动。30秒后量其垂直两方向的直径，取平均值作为浆液的流动度。

粘度是指浆液配成后的初始粘度，不是反应开始的粘度，它是可灌性好坏的指标，常用粘度计测定。

(2) 稳定性要求 浆液的稳定性好坏直接影响到固结体质量。水泥浆液稳定性以析水率计，其稳定性好者，初凝析水率小，水泥的沉降速度慢，分散性好，并且浆液混合后经高压喷射而不改变其物理化学性质。

(3) 气泡少 浆液气泡多，固结体密实度低，强度和抗渗性差。

(4) 胶凝时间 胶凝时间是指从浆液开始配制到土体混合后逐渐失去其流动性为止的时间。根据施工工艺及注浆设备来选择合适的胶凝时间。胶凝时间可以通过浆液的配方、外加剂的掺量、水灰比及温度来控制。

(5) 良好的力学性能 浆液的力学性能愈好，固结体的强度愈高。浆液的力学性能与其配合比、材料品种及浆液浓度有关。

(6) 无毒无嗅，不污染环境。

(7) 结石率高 浆液同土体颗粒胶结后，固结体中土颗粒结石率越高，胶结越好，固结体强度和耐久稳定性就越好。

2、浆液的种类及主要性能

浆液主要有水泥浆液和化学浆液两类。水泥浆液更为常用。

水泥浆液的性能与水灰比、搅拌时间、水泥标号、外加剂成分及用量有关。

水灰比大固然可喷性好，然而超过某值，无论是结石率还是固结体强度都大为降低。从表1—3可看出此影响的大小。工程中常用的水灰比为1:1~1.5:1。

水泥浆液搅拌时间对固结体强度有影响。旋喷过程中，为了保证水泥浆液呈均匀状态，必须连续搅拌。实践证明，搅拌超过一定时间后，不仅延长浆液的凝固时间，还影响固结体

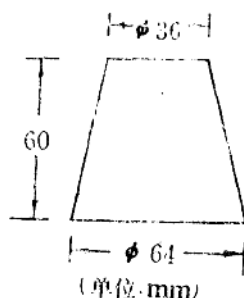


图1—10 流动度试验锥

表 1—8

水灰比对纯水泥浆液的影响

水 灰 比 (重量比)	0.5 : 1	0.75 : 1	1 : 1	1.5 : 1	2 : 1
粘 度 (Pa·s)	139	33	18	17	16
结 石 率 (%)	99	97	85	67	56
28天抗压强度 (MPa)	22	11.2	8.9	2.2*	2.8

* 这是一次实测数据

的强度, 严重时甚至会发生不凝的危险。如水灰比为 1 : 1 时, 搅拌 60 分钟, 固结体强度最高, 超过 60 分钟, 结石强度就开始下降。

掺入一定量的外加剂将会改善水泥浆液的性能。施工中常用的掺和剂有:

(1) “E·S” 速硬剂 水泥浆液中加入水泥量 1~2% 的 “E·S” 速硬剂, 可使固结体收缩性降低, 强度提高。“E·S” 速硬剂化学组成见表 1—4。

表 1—4

“E·S” 速硬剂配方

成 分	CaO	SO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fl ₂ O ₃	MgO	烧失量	不溶物
含量 (%)	42.6	28.3	23.9	2.2	0.7	0.2	0.6	0.8

(2) 膨润土 水泥浆液中加入 3% 的膨润土, 将会增长浆液中水泥悬浮时间, 减少浆液的析水率, 提高其稳定性。

(3) 水玻璃 水玻璃对水泥浆液的影响和水玻璃的浓度及水泥浆液的水灰比有关。

(4) 氯化钙 水泥浆液中加入 2~4% 的氯化钙, 将会提高固结体的早期强度 (图 1—11)。

3、水泥浆液的类型与配方

(1) 普通型 适用于无特殊要求的工程。

它一般采用 325 或 425 的硅酸盐水泥浆液。不加入任何掺和剂, 水灰比为 1 : 1~1.5 : 1, 固结体 28 天的抗压强度最大可达 1.0~20 MPa。

(2) 速凝—早强型 适于地下水渗流快的土层或其它需要早强的工程。这类型常掺入氯化钙或三乙醇胺等早强剂来使固结体得到早强。氯化钙掺和量常为 2~4% 的水泥用量。

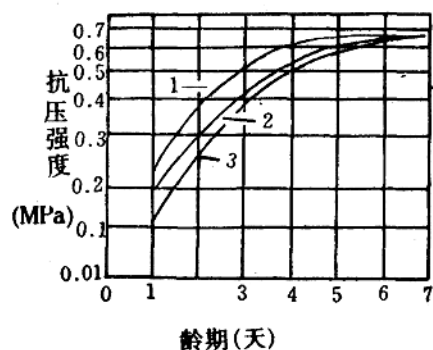


图 1—11 粘土中不同配方的早期强度曲线

- 1—水泥浆中掺入 4% CaCl₂;
2—水泥浆中掺入 2% CaCl₂;
3—水泥浆中不掺 CaCl₂。

(3) 高强型 当固结体的平均抗压强度在20MPa以上的称为高强型。要达到高强型,除要求使用不低于425•普通硅酸盐水泥外,还要求控制水灰比及掺入高效能扩散剂。常用高效扩散剂有亚甲基二苯磺酸钠(NNO);三乙醇胺(NR₃);亚硝酸钠(NaNO₂);β—苯磺酸盐;甲醛缩合物(NF)以及硫代硫酸钠(Na₂S₂O₃)等。这些掺和剂的用量及其影响见表1-5。

表 1—5

掺和剂对固结体强度影响

主 剂		掺 和 剂		抗 压 强 度 (MPa)				抗折强度
名 称	用量(%)	名 称	用量(%)	28天	3月	6月	一年	(MPa)
525•普通硅酸 盐水泥	100	NNO NR ₃	0.5 0.05	11.72	16.05	17.40	18.80	3.69
		NNO NR ₃ NaNO ₂	0.5 0.05 1	13.59	18.62	22.80	24.68	6.27
		NF NR ₃ Na ₂ S ₂ O ₃	0.5 0.05 1	14.14	19.37	27.80	29.00	7.36

(4) 抗冻型 抗冻型浆液常用的有:

1) 水泥—沸石粉浆液。沸石粉用量约为水泥量的20%,但沸石粉质量要严格控制,其中石膏含量不超过5%,粉末筛余量不超过总重量15%。

2) 水泥—三乙醇胺、亚硝酸钠浆液。三乙醇胺掺入量为0.65%,亚硝酸钠为1%。

3) 水泥—扩散剂(NNO)浆液。其中NNO掺入量为0.5%。

抗冻型的水泥最好用普通水泥而不宜用火山灰水泥。

(三) 固结体的工程性能和浆液配方的选择

旋喷注浆后形成的固结体的工程性能与许多因素有关,如土质、材料特性、水灰比大小、掺和料的配方以及施工机具的技术性能等等。目前尚难于根据工程的要求对各影响因素作精确的计算或设计。下面仅用工程实例的资料作简单介绍。

1、加固后固结体的物理力学性能变化

(1) 固结体的干重度 旋喷固结体内有许多微小气孔,对粘性土旋喷加固后其重度经常轻于原状土,但砂类土由于颗粒较粗,喷浆时被冒浆带出的细小颗粒不多,因此它的固结体可能略重于原状土。表1-6为旋喷固结体干重度变化的资料。

(2) 渗透系数 旋喷固结体虽然存在着微小气孔但不连通,水泥浆液固化后的结晶胶结物使它的渗透性降低。试验资料表明,粗砂的固结体,其渗透系数可降低至 10^{-5} cm/s以下(表1-7)。

表 1—6

旋喷固结体干重度

土 类	平 均 干 重 度 (N/m^3)		
	原 状 土	旋喷固结体	相对差值 (%)
黄土状土	1.64×10^4	1.33×10^4	-18.8
亚粘土	1.52×10^4	1.32×10^4	-13.4
砂 土	1.55×10^4	1.75×10^4	+12.9
淤 泥		1.41×10^4	
轻质土壤	1.68×10^4	1.58×10^4	-8.9

表 1—7

旋喷固结体渗透系数

土 类	原状土渗透系数 $k (cm/s)$	旋喷体渗透系数 $k (cm/s)$	备 注
轻亚粘土	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.24×10^{-8}	硅酸盐水泥
(粉土)	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	2.07×10^{-7}	矿渣水泥
粗 砂	8.9×10^{-2}	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	
粘土(黑色)	2.5×10^{-5}	1.12×10^{-8}	硅酸盐水泥
细 砂	10^{-3}	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	
砂 砾 石	10^{-1}	5.2×10^{-10}	
	10^{-1}	6.7×10^{-7}	
砂 卵 石		$5 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-10}$	

(3) 固结体的力学强度及单桩承载力 旋喷固结体强度并不均匀, 中心强度较低而边缘强度高, 形成一个坚硬的外壳。砂土旋喷体最大抗压强度平均为 $10 \sim 20 MPa$, 粘性土旋喷体为 $5 \sim 10 MPa$ 。最大抗折强度通常为最大抗压强度的 $1/5 \sim 1/10$ 。若作为单桩考虑, 竖向承载力试验值可参见表 1—8。

2、影响旋喷固结体性能的主要因素

(1) 土质的影响 土质和土的紧密度对固结体强度都有明显影响。就加固后的强度来说, 通常砂土固结体强度大于粘性土固结体。

(2) 材料特性 水泥强度越高, 固结体强度越大。掺和剂不同, 固结体的性能也不同。