Dr. Han WX

灌 入 固 化 物
（化学加固）

地 基 处 理

Ground Treatment

教师 *Instructor*

Dr. Wenxi Han **韩文喜**

联系方式

Phone: 13880536952

E-mail: hwx@cdut.edu.cn

本课程必备条件 ***Prerequisites:***

《土力学》

《地基与基础》

《岩土工程施工》

第六章 灌入固化物

6.1 概述

Dr. Han WX

灌人固化物是指在软弱地基中灌入水泥等固化物，通过固化物和地基土体间产生一系列物理、化学作用形成水泥土或其他固化土，通过固化土与原状土形成复合土体，达到加固地基的一类地基处理方法。

在地基中灌入的固化物有水泥、石灰以及其他化学固化材料。

分类：深层搅拌法、高压喷射注浆法和灌浆法。

深层搅拌法可分为喷浆深层搅拌法和喷粉深层搅拌法两种，喷粉深层搅拌法又称为粉喷法。在深层搅拌法中，通常采用水泥为固化物，也有采用石灰为固化物。

高压喷射注浆法按施工工艺可分为旋喷法、定喷法和摆喷法；

按喷射形式又可分为单管法、双管法和三重管法；

按高压喷射注浆施工方向又可分为垂直高压喷射注浆和水平高压喷射注浆

灌浆法按施工工艺又可分为渗人性灌浆法、劈裂灌浆法和压密注浆法等。

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.1 加固机理、分类和适用范围

深层搅拌法是通过特制的施工机械——各种深层搅拌机，沿深度将固化剂(水泥浆或水泥粉或石灰粉，外加一定的掺合剂)与地基土就地强制搅拌形成水泥土桩或水泥土块体的一种地基处理方法。

通过深层搅拌法在地基中形成的水泥土强度高、模量大、渗透系数小，可用于提高地基承载力，减少沉降，也可用于形成止水帷幕，构筑挡土结构等。

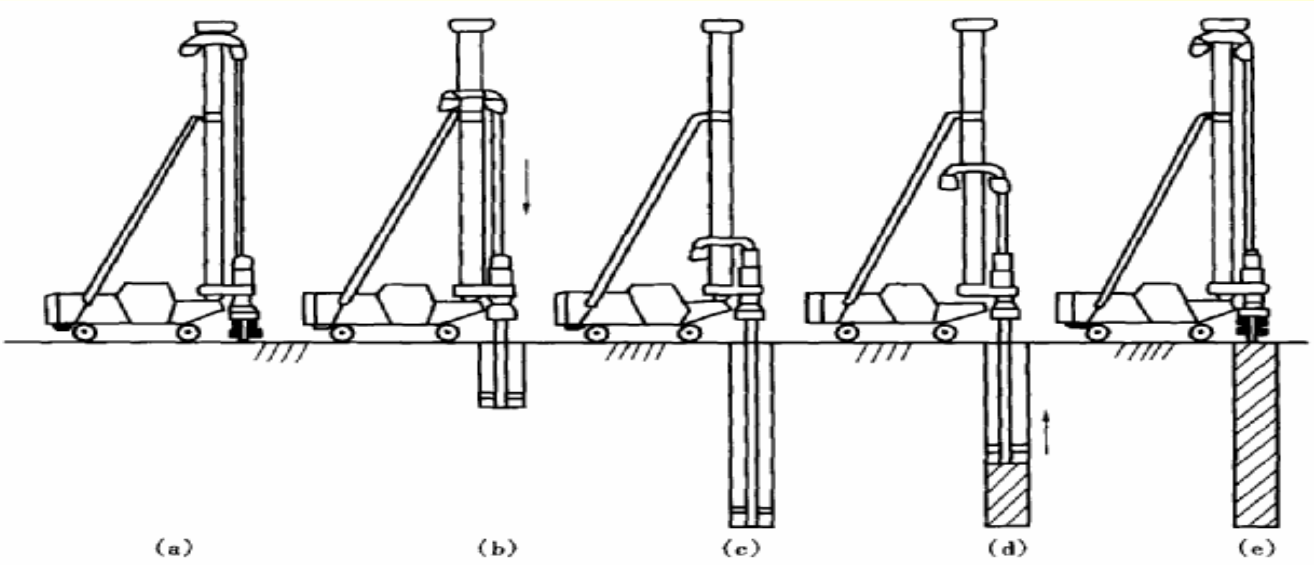


图 6-2-1 深层搅拌法施工顺序示意图

(a) 机械就位；(b) 边搅边喷；(c) 达设计深度；(d) 搅拌上升；(e) 搅拌结束

第六章 灌入固化物

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX





6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

深层搅拌法分喷浆深层搅拌法和喷粉深层搅拌法两种。

喷浆深层搅拌法通过搅拌叶片将由喷嘴喷出的水泥浆液和地基土体就地强制拌和均匀形成水泥土；

喷粉深层搅拌法通过搅拌叶片将由喷嘴喷出的水泥粉体和地基土体就地强制拌和均匀形成水泥土。

一般说来，喷浆拌和比喷粉拌和均匀性好；但有时对高含水量的淤泥，喷粉拌和也有一定的优势。

深层搅拌法固化物通常采用水泥为，也有采用石灰为固化物。目前采用石灰为固化物的深层搅拌法在我国已不多见。

深层搅拌法适用于处理淤泥、淤泥质土、黄土、粉土和黏性土等地基。对有机质含量较高的地基土，应通过试验确定其适用性。深层搅拌法是通过搅拌叶片就地拌和的，当加固地基土体的抗剪强度较高时，就地搅拌所需的功率也较大。遇到抗剪强度较高的土层时，采用深层搅拌法可能会搅不动。因此，深层搅拌法适用于加固较软弱的土层。

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.2 水泥土的基本特性

深层搅拌法是通过特制的深层搅拌机械，在地基中沿深度就地将泥浆或水泥粉和地基土强制搅拌，经过一定时间，通过土和水泥水化物间的物理化学作用，形成有较高模量、较大强度和渗透性较低的水泥土固结体，以达到地基处理的目的。

下面介绍水泥与黏性土形成水泥土的主要硬化机理。

当水泥浆与软黏土拌和后，水泥颗粒表面的矿物很快与黏土中的水发生水解和水化反应，在黏土颗粒间生成各种水化物。这些水化物有的继续硬化，形成水泥石骨料；有的则与周围具有一定活性的黏土颗粒发生反应。通过离子交换和团粒化作用使较小的土颗粒形成较大的土团粒；通过凝硬反应，逐渐生成不溶于水的稳定的结晶化合物，从而使土的强度提高。水泥水化物中游离的氢氧化钙能吸收水中和空气中的二氧化碳，发生碳酸化反应，生成不溶于水的碳酸钙，这种碳酸化反应也能使水泥土增加强度。黏土颗粒和水泥水化物之间的物理化学反应十分复杂，反应过程也是比较缓慢的。因此，水泥土的硬化过程也需要较长的时间。

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.2 水泥土的基本特性

不同水泥掺合比和不同龄期下的水泥土无侧限抗压强度（单位：MPa） 表 6-2-1

a_w (%) \ T (d)	7	14	28	60	90	150
5	0.23	0.24	0.39	0.42	0.45	
10	0.67	0.79	0.94	1.45	1.45	
15	0.91	0.89	1.35	1.69	2.41	2.90
20	1.47	2.11	2.40	3.28	3.56	
25	2.10	2.59	3.15	4.26	4.59	

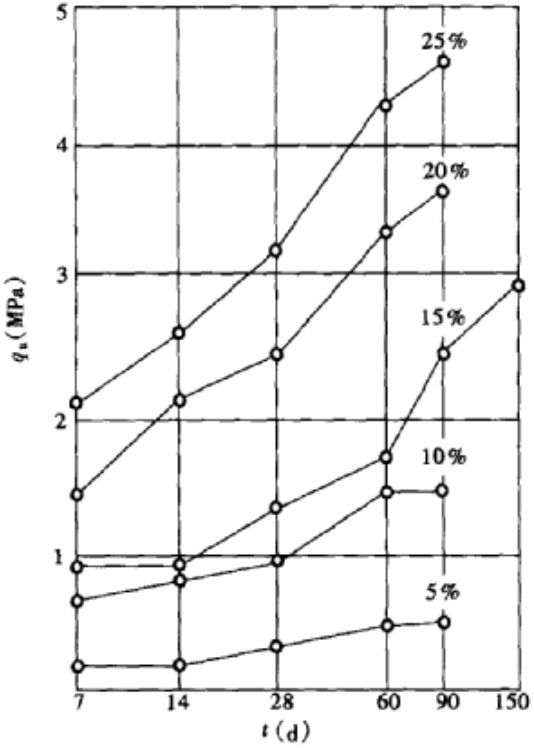


图 6-2-2 不同水泥掺合比和不同龄期的水泥土无侧限抗在强度（引自李明逵，1991）

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.2 水泥土的基本特性

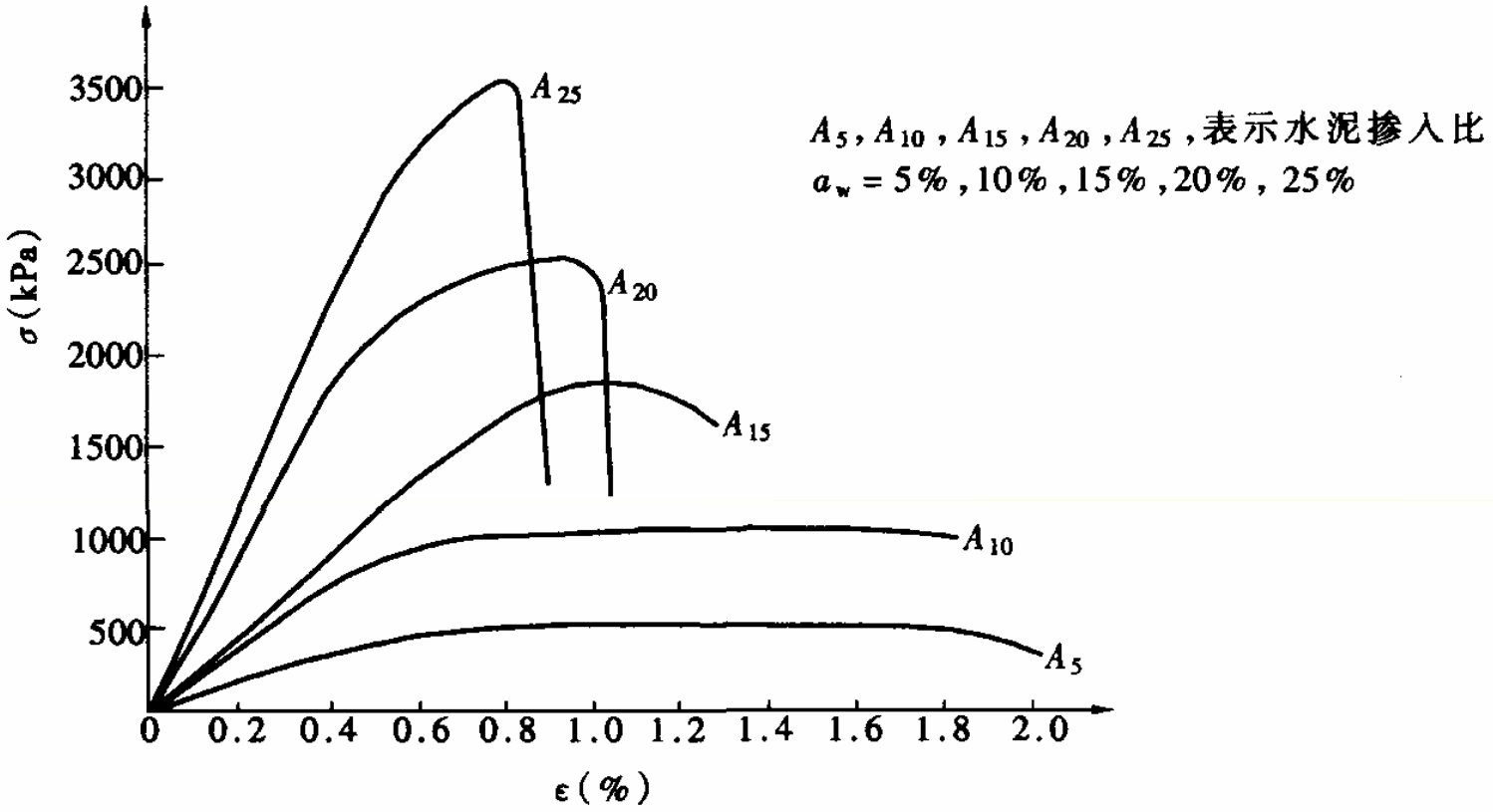


图 6-2-3 水泥土无侧限压缩试验应力应变关系

（引自胡同安等，1983）

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.2 水泥土的基本特性

水泥土水泥掺合比对压缩特性的影响 表 6-2-2

水泥掺合比 a_w（%）	压缩系数 $a_{1\sim2}$ ($10^{-6}kPa^{-1}$)	压缩系数 $a_{2\sim4}$ ($10^{-6}kPa^{-1}$)	压缩模量 $E_{S(1\sim2)}$（kPa）	压缩模量 $E_{S(2\sim4)}$（kPa）	$E_{S(1\sim2)}$水泥土 / $E_{S(2\sim4)}$原状土	$E_{S(2\sim4)}$水泥土 / $E_{S(2\sim4)}$原状土
原状土	837		2609	1739		
10	59	139	31804	16103	14.6	9.26
15	40	58	58870	40531	22.56	23.31
20	31	56	73426	40702	28.22	23.41

（引自李明逵，1991）

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.3 工程应用

深层搅拌法加固地基在地基中形成的水泥土具有较高的强度和模量，以及具有较小的渗透性。目前，深层搅拌法在我国工程应用主要有下述几个方面

1．形成水泥土桩复合地基

深层搅拌法形成的水泥土增强体强度和变形模量比天然土体提高几倍至数十倍，形成水泥土桩复合地基可有效提高地基承载力和减少地基沉降。水泥土增强体复合地基可具有桩式复合地基(图6-2-4a、b)和格构式复合地基(图6—2-4，c)

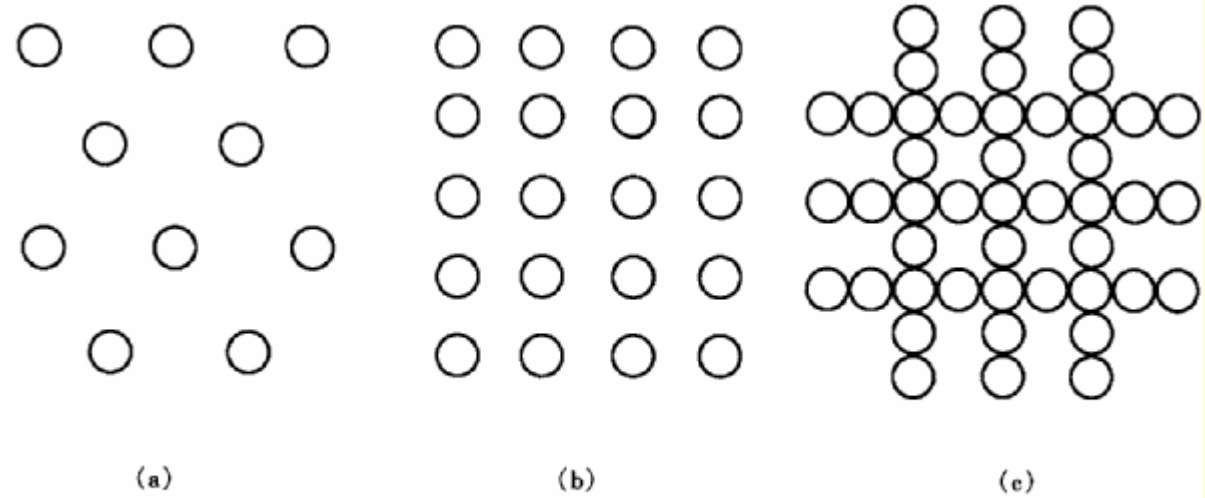


图 6-2-4 复合地基平面布置形式

(a) 三角形布置；(b) 正方形布置；(c) 格构布置

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.3 工程应用

深层搅拌法加固地基在地基中形成的水泥土具有较高的强度和模量，以及具有较小的渗透性。目前，深层搅拌法在我国工程应用主要有下述几个方面

1．形成水泥土桩复合地基

水泥土增强体复合地基桩式布置可采用三角形布置或正方形布置，有时也采用矩形布置。有时为了获得更高的承载能力，可取复合地基置换率m=1.0，即在平面上对地基土体全面进行搅拌，形成水泥土块体基础，如图6-2-5所示。有时为了提高水泥土桩承载力，减小桩体压缩量，在水泥土桩中嵌入一钢筋混凝土桩以形成组合桩，如图6-2-6所示。

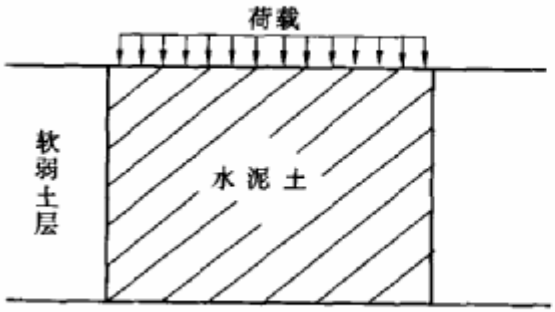


图 6-2-5 水泥土块体基础

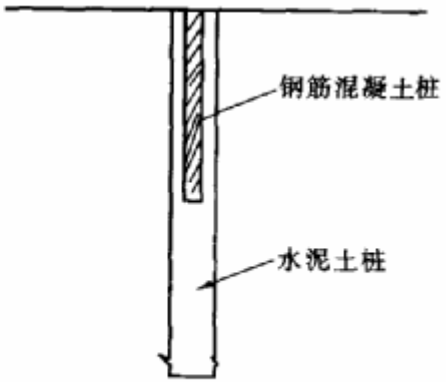


图 6-2-6 组合桩示意图

6.2 深层搅拌法

6.2.3 工程应用

1. 形成水泥土桩复合地基:

水泥土增强体复合地基广泛应用于下述工程:

(1) 建筑物地基，如多层民用住宅、办公楼筑物地基;

(2) 堆场地基，包括室内、室外堆场;

(3) 高速公路和机场停机坪、跑道地基等。

6.2 深层搅拌法

6.2.3 工程应用

2. 形成水泥土支挡结构:

对在软黏土地基中开挖深度为5m左右的基坑，应用深层搅拌法形成的水泥土重力式挡墙可以较充分利用水泥土的强度和防渗性能。

水泥土重力式挡墙既是挡土结构又是防渗帷幕。为节省成本，水泥土重力式挡墙一般做成格构形式，如图6-2-7所示。图中重力式挡墙高为1，宽为B，基坑深度为H，支挡结构插入深度为d。由图6-2-7(b)可以看到，水泥土重力式挡墙设计计算方法可采用一般重力式挡土墙设计计算方法。

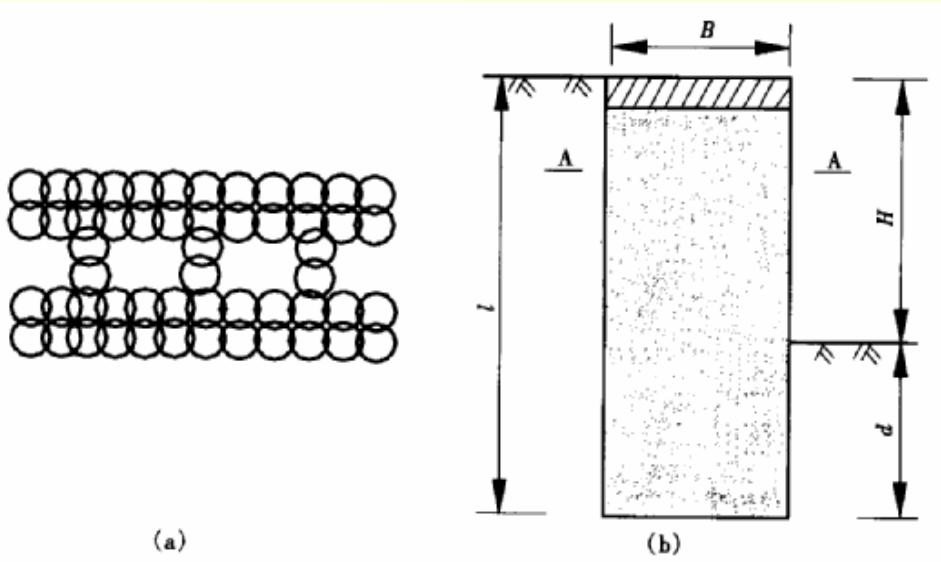


图 6-2-7 格构形水泥土重力式挡墙

(a) A－A 剖面；(b) 重力式挡墙

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.3 工程应用

2. 形成水泥土支挡结构：

为了克服水泥土抗拉强度低的缺点，有人在水泥土挡墙中插置竹筋，也可取得较好效果。如图6-2-8所示，在水泥土挡墙中插置型钢，通常称为加筋水泥土挡墙。在日本，在水泥土挡墙中插置型钢称为SMW工法。近年来加筋水泥土挡墙在基坑围护工程中得到较多应用。国内外实践表明，如不能回收钢材，加筋水泥土挡墙的成本较高。在插置型钢前，在型钢表面涂上专用涂料，在围护功能完成后可拔出型钢，重复使用。

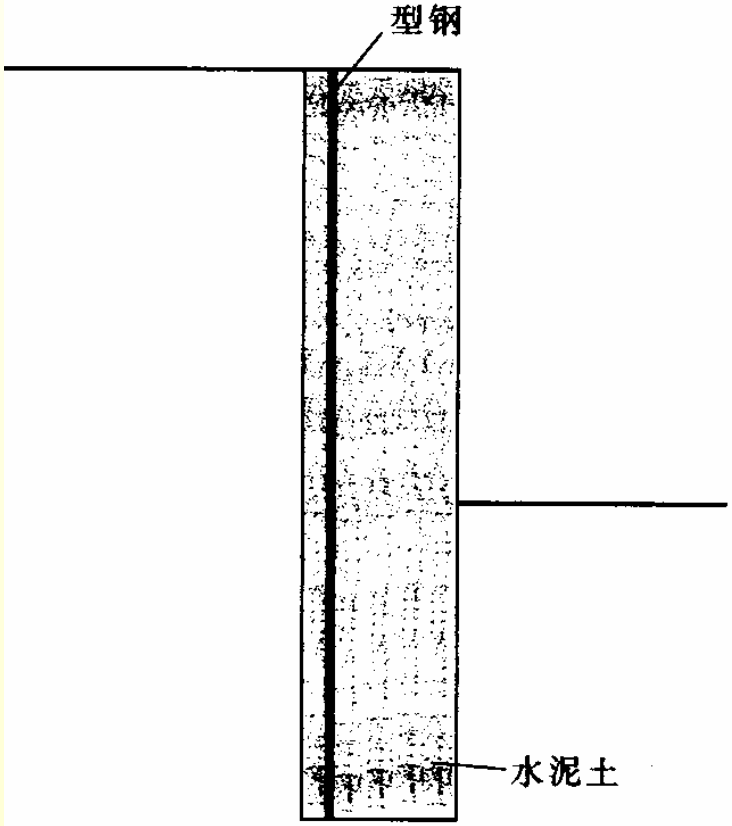


图 6-2-8 加筋水泥土挡墙

6.2 深层搅拌法

6.2.3 工程应用

3. 形成水泥土防渗帷幕：

水泥土具有很好的防渗水性能。近几年水泥土防渗帷幕被广泛用于软黏土地基基坑开挖工程和其他工程中的防渗帷幕。水泥土防渗帷幕由相互搭接的水泥土桩组成。视土层土质情况以及防渗帷幕的深度，可采用一排、两排或多排相互搭接的深层搅拌桩组成的水泥土防渗帷幕。

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.3 工程应用

4. 其他方面的应用

深层搅拌法还在下述工程中得到应用。如图6-2-9(a)所示，水泥土桩与钢筋混凝土灌注桩联合形成拱形组合型围护结构应用于深基坑围护工程；如图6-2-9(b)所示，深层搅拌法形成的水泥土用于沟底、河道底、基坑底水平止水层；如图6-2-9(c)所示，深层搅拌法形成的水泥土应用于底部水平支撑；如图6-2-9(d)所示，深层搅拌法形成的水泥土应用于盾构施 工地段软弱地基土体的加固，以保证盾构稳定掘进，减小环境效应；如图6-2-8(e)所示，水泥土应用于基坑围护支护结构被动区土质改良以增大被动土压力；如图6—2-9(f)所示，水泥土应用于增加桩的侧面摩阻力，提高桩的承载力等。

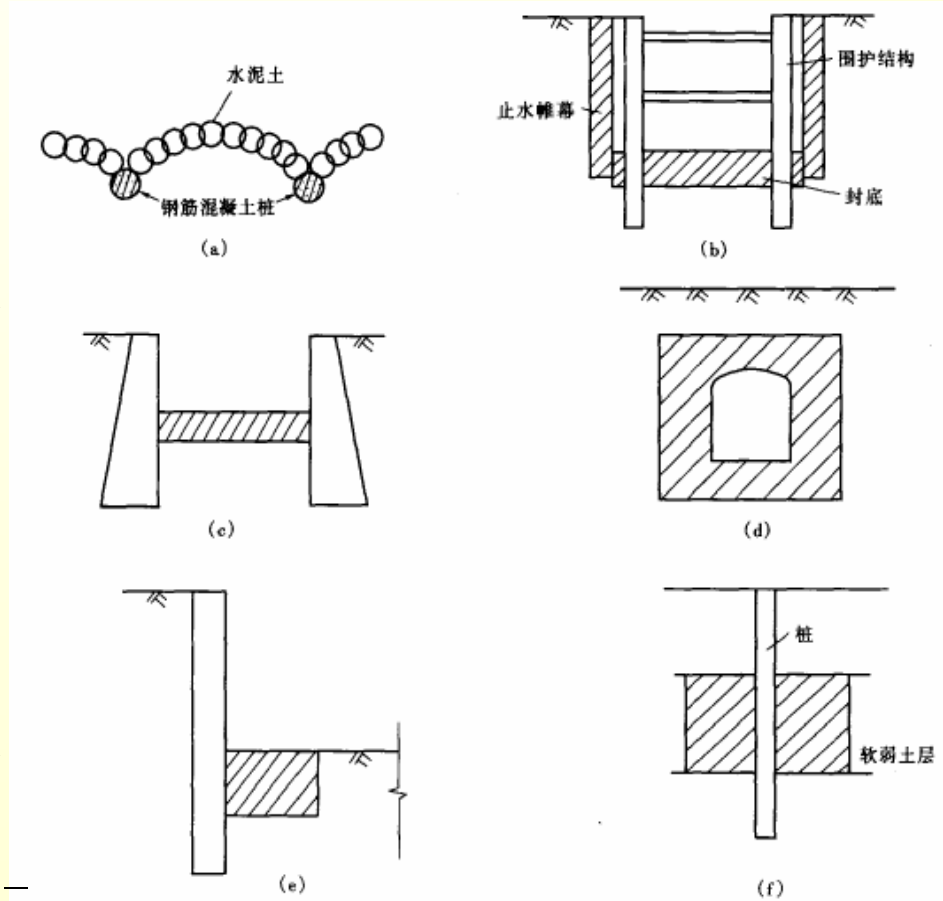


图 6-2-9 深层搅拌法其他应用示意图

(a) 拱形组合型围护结构；(b) 水平止水层；(c) 水平底部支撑；(d) 盾构施工地基土质改变；(e) 被动区土质改变；(f) 增加桩侧摩阻力

6.2 深层搅拌法

6.2.4 深层搅拌桩复合地基设计

深层搅拌桩复合地基设计步骤如下：

1．初步确定单桩的容许承载力

根据天然地基工程地质情况和荷载情况，初步确定水泥土桩的桩长l和桩径d，水泥掺合比，并由此初步确定单桩的容许承载力。

6-2-4由桩身材料决定单桩承载力计算公式，

6-2-5由桩侧摩阻力和桩端承载力提供的单桩单桩承载力。

$$p_p = \eta f_{cu} A_p \tag{6-2-4}$$

$$p_p = u_p \sum_{i=1}^{n} q_{si} l_i + a q_p A_p \tag{6-2-5}$$

式中 f_{cu}——与搅拌桩桩身水泥掺合比相同的室内水泥土试块立方体抗压强度平均值，kPa；

η——桩身强度折减系数，一般取0.20～0.33；

q_{si}——桩周第 i 层土的侧向容许摩阻力；

u_p——桩的周长，m；

l_i——桩长范围内第 i 层土的厚度，m；

q_p——桩端地基土未经修正的容许承载力，kPa；

a——桩端天然地基土的容许承载力折减系数，可取0.4～0.6；

A_p——桩的截面面积。

6.2 深层搅拌法

6.2.4 深层搅拌桩复合地基设计

2．确定复合地基容许承载力要求值

根据荷载的大小和初步确定的基础深度D和宽度B，可确定复合地基容许承载力要求值。

3．计算复合地基置换率

根据所需的复合地基容许承载力值、单桩容许承载力值和桩间土容许承载力值，可采用下式计算复合地基置换率 m：

$$m = \frac{p_c - \beta p_s}{\frac{p_p}{A_p} - \beta p_s} \tag{6-2-6}$$

式中 p_c——复合地基容许承载力，kPa；

m——复合地基置换率；

p_s——桩间天然地基土容许承载力，kPa；

p_p——桩的容许承载力，kN；

A_p——桩的横截面积；

β——桩间土承载力折减系数。

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.4 深层搅拌桩复合地基设计

4. 确定桩数

复合地基置换率确定后，可根据复合地基置换率确定总桩数：

$$n = \frac{mA}{A_p} \qquad (6\text{-}2\text{-}7)$$

式中 n——总桩数；

A——基础底面积。

5. 确定桩位平面布置

总桩数确定后，即可根据基础形状和采用一定的布桩形式(如三角形、正方形或梯形布置等)合理布桩，确定设计实际用桩数。

6.2 深层搅拌法

Dr. Han WX

6.2.4 深层搅拌桩复合地基设计

6. 验算加固区下卧软弱土层的地基强度

当加固范围以下存在软弱下卧土层时，应进行加固区下卧土层的强度验算。可将复合地基加固区视为一个假想实体基础进行下卧层地基强度验算。

$$R_b = \frac{p_c \cdot A + G - V\bar{q}_s - p_s(A - F_1)}{F_1} \leqslant R'_a \qquad (6\text{-}2\text{-}8)$$

式中 R_b——假想实体基础底面处的平均压力；

G——假想实体基础的自重；

V——假想实体基础的侧表面积；

$\bar{q}_s$——桩周土的平均摩擦力；

F_1——假想实体基础的底面积；

R'_a——假想实体基础底面处修正后的地基容许承载力；

当加固区下卧层强度验算不能满足要求时，需重新设计。一般需增加桩长或扩大基础面积，直至加固区下卧层强度验算满足要求。

6.2 深层搅拌法

6.2.4 深层搅拌桩复合地基设计

7. 沉降计算

在竖向荷载作用后，水泥土桩复合地基产生的沉降S包括复合地基加固区本身的压缩变形量S_1和加固区以下下卧土层的沉降量S_2两部分，即水泥土桩复合地基沉降可采用分层总和法计算，其计算式为：

$$S = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta p_i}{E_i} h_i \qquad (6\text{-}2\text{-}10)$$

式中 Δp_i——第 i 层土上附加应力增量；

E_i——第 i 层土压缩模量。对加固区，为复合压缩模量 E_c；

h_i——第 i 层土的厚度。

复合压缩模量 E_c 可采用下式计算：

$$E_c = mE_p + (1 - m)E_s \qquad (6\text{-}2\text{-}11)$$

式中 m——复合地基置换率；

E_p——水泥土压缩模量；

E_s——土的压缩模量。

若沉降不能满足设计要求，则应增加桩长，再重新进行设计。

6.2 深层搅拌法

6.2.4 深层搅拌桩复合地基设计

8. 确定垫层

根据基础情况可在复合地基和基础间设置垫层。对刚性基础，可设置一柔性垫层，如设置30-50cm厚的砂石垫层；对土堤等情况，可设置一刚度较大的垫层，如加筋土垫层或灰土垫层等。

深层搅拌桩复合地基设计完成后，尚需通过现场试验检验复合地基承载力或水泥土单桩承载力。若现场试验检验达不到设计要求的承载力值，应修改设计。

6.2 深层搅拌法

6.2.5 质量检验

水泥土的施工质量是采用深层搅拌法加固地基能否成功的关键问题。影响水泥土施工质量的因素很多。

质量检验主要方法如下：

(1)检查施工记录：包括桩长、水泥用量、复喷复搅情况、施工机具参数和施工日期等。

(2)检查桩位、桩数或水泥土结构尺寸及其定位情况。

(3)在已完成的工程桩中应抽取2%～5%的桩进行质量检验。一般可在成桩后7日以内，使用轻便触探器钻取桩身水泥土样，观察搅拌均匀程度，同时根据轻便触探击数用对比法判断桩身强度。也可抽取5%以上桩采用动测进行质量检验。

(4)采用单桩载荷试验检验水泥土桩的承载力。也可采用复合地基载荷试验检验深层搅拌桩复合地基的承载力。

下面通过一个工程实例来进一步说明水泥搅拌桩复合地基设计计算过程：

南京南湖地区东升片小区工程地质情况如表 6-2-3 所示。东升片小区的六层住宅荷载如下：载重横墙为 196kN/m，自承重纵墙为 137kN/m，阳台牛腿每个传力为 19.6kN，双阳台牛腿每个传力 39.2kN。

南湖地区东升小区土的物理力学指标 **表 6-2-3**

层序	土名	层底埋深（m）	含水量 w（%）	孔隙比（e）	塑性指数 I_P	压缩模量 E_{s1-2}（MPa）	内聚力 c（kPa）	内摩擦角 φ（°）	桩周土的容许摩擦力 f（kPa）	桩尖土的容许承载力 R_j（kPa）	地基土容许承载力（kPa）
1	填　土	2.0～2.9									
2	亚黏土	3.7～3.8	35.2	0.972	15.1	4.06	10	15.0	12		90
3	淤泥质亚黏土	13.9～14.0	41.5	1.185	15.0	2.06	9	13.0	9.8		70
4	淤泥质亚黏土	45.8～46.5	38.4	1.127	16.0	3.06	11	11.5	9.8		70
5	淤泥质亚黏土与粉砂互层	49.0～49.8	28.8	0.867	10.6	5.21	10	20.0	20		120
6	粉细砂	58.7～59.5	31.4	0.882		9.16	6	23.0	30	1500	250
7	卵砾石夹黏性土	60.0～63.4								4000	300
8	泥质粉砂岩	63.5～69.4									400～600
9	泥质黏砂岩	未钻穿									1000

搅拌桩复合地基的设计参数初步确定如下：深层搅拌桩的直径取 500mm，桩的截面积 $A_p = 0.196m^2$，搅拌桩的周边长 $S_p = 1.57m$，桩长取 $l_p = 10.0m$，水泥掺合比采用 $a_w = 15\%$。根据初步确定的设计参数和天然地基情况以及荷载情况，设计计算如下：

（1）确定单桩承载力

根据桩侧摩阻力确定单桩承载力。按地质勘察报告桩侧容许摩阻力取为 $f = 9.8kN/m^2$，搅拌桩单桩承载力为：

$$p_p = fS_p l_p = 153.9kN \tag{6-2-12}$$

根据桩身强度确定单桩承载力。桩身强度取 $R = 2000kPa$，折减系数取 $\eta = 0.33$，搅拌桩单桩容许承载力为：

$$p_p = \eta R A_p = 129.4kN \tag{6-2-13}$$

综合以上两种计算，取单桩容许承载力 $p_p = 120kN$。

（2）确定所需的复合地基承载力值

根据上部荷载以及条基宽度、深度，确定所需的复合地基承载力。初步确定横墙下条基宽 $B_1 = 15.5m$，纵墙下条基宽 $B_2 = 1.0m$，基础埋深统一取为 $D = 1.0m$，基础底面以上地基土及基础容重统一取为 $\gamma = 19.6kN/m^3$，横墙下荷载为 $N_1 = 196kN/m$，纵墙下荷载为 $N_2 = 137.2kN/m$，则所需复合地基承载力分别为：

①横墙下基础

$$P_{c1} \geqslant N_1/B_1 + D\gamma = 151.6\text{kN/m}^2 \tag{6-2-14}$$

②纵墙下基础

$$P_{c2} \geqslant N_2/B_2 + D\gamma = 156.8\text{kN/m}^2 \tag{6-2-15}$$

综上计算，取所需复合地基承载力 $P_C = 156.8\text{kN/m}^2$。

（3）确定复合地基置换率，即确定复合地基承载力

根据所需的复合地基承载力值、单桩容许承载力值、桩间土容许承载力值，计算复合地基置换率 m。确定了复合地基置换率，也就确定了复合地基承载力设计值。

参照地质勘察报告，取桩间土容许承载力 $P_s = 68.6\text{kN/m}^2$。由于水泥搅拌桩桩端仍处于软土层，取桩端折减系数 $\lambda = 0.5$，则复合地基置换率为：

$$m = (P_c - \lambda P_s)/(p_p/A_p - \lambda P_s) \times 100\% = 21.2\% \tag{6-2-16}$$

取置换率 $m = 22\%$，即复合地基承载力可满足要求。

（4）布桩设计

根据复合地基置换率要求、条基的宽度和搅拌桩的桩径确定布桩间距。

a. 横墙下

每米距布桩数：

$$n_1 = B_1 m/A_p = 1.684 \text{ 根} \tag{6-2-17}$$

布桩间距要求：

$$S_1 = 1/n_1 = 0.59\text{m} \tag{6-2-18}$$

b. 纵墙下

每米距布桩数：

$$n_2 = B_2 m/A_p = 1.122 \text{ 根} \tag{6-2-19}$$

布桩间距要求：

$$S_2 = 1/n_2 = 0.89\text{m} \tag{6-2-20}$$

考虑到局部加强以及施工便利性等因素，实际布桩间距可对以上计算结果进行适当调整。

另外：对于阳台、楼梯间等处有集中荷载传下的地方，采用将条基外挑1.5m的方式加以处理，外挑条基下复合地基设计同上所述。结果应偏于安全。

（5）验算加固区下卧土层强度

根据上部荷载、桩群体的体积力以及桩群体的侧摩阻力验算复合地基下卧层的强度。基本计算数据如下：

加固地基的基础底面积

$$F = 390.05\text{m}^2$$

桩群体底面面积

$$F_1 = 260.34\text{m}^2$$

桩群体侧表面面积

$$F_s = 5572\text{m}^2$$

桩群体的体积力

$$G = \gamma_p F_1 l_p = 20410.66\text{kN} \tag{6-2-21}$$

其中 γ_p 为复合地基上的平均浮容重，取

$$\gamma_p = 7.85\text{kN/m}^3$$

桩群体底面平均压力为：

$$p_a = [R_c F + G - \lambda R_s(F - F_1) - f_s F_s]/F_1 = 86.5\text{kN/m}^2 \tag{6-2-22}$$

下卧土层的强度修正：

下卧层为③$_1$层，为淤泥质亚黏土，其容许承载力为 $[R] = 68.6\text{kN/m}^2$，取其埋深为一个 $D = l_p = 10.0\text{m}$，取深度修正数 $m_D = 1.0$，其修正强度为：

$$R = [R] + m_D \gamma_p (D - 1.5) = 135.2\text{kN/m}^2 > p_a = 86.5\text{kN/m}^3 \tag{6-2-23}$$

所以，下卧土层的强度满足要求。

(6) 沉降计算

复合地基的沉降 S 可分为两部分：其一为复合地基加固区部分即加固区的压缩量 S_1，其二为加固区下卧层的压缩量 S_2。根据经验，多层住宅下水泥土桩复合地基加固区压缩量小于 3cm，因而可取 $S_1 = 3\text{cm}$。

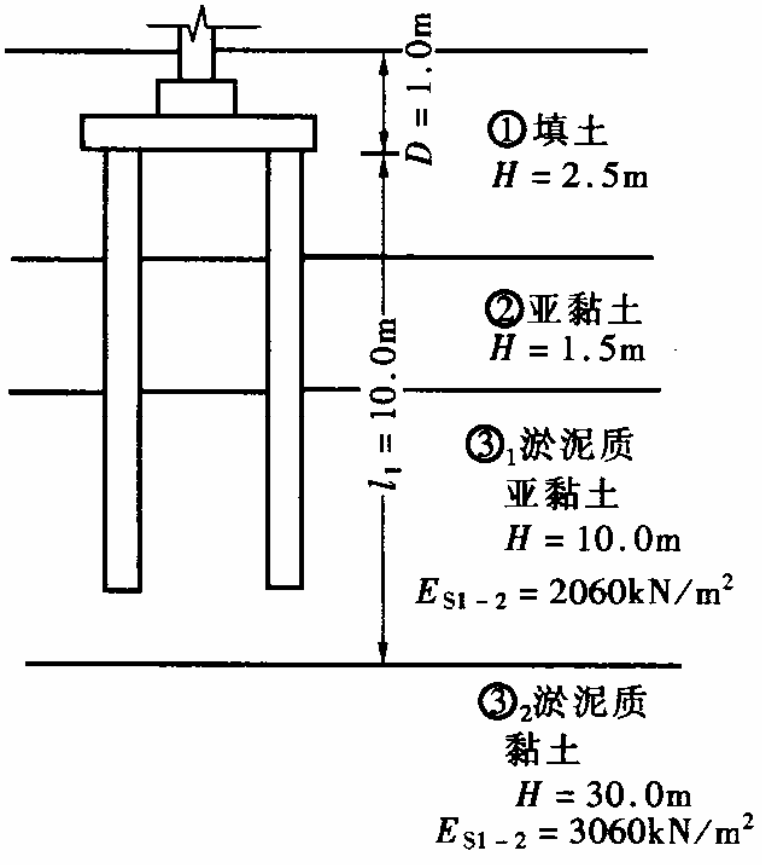
下卧层压缩量按分层总和法计算，下卧层共计有两层：③$_1$层厚3m，压缩模量 $E_{s1\sim2}=2060\text{kN/m}^2$，③$_2$层厚30m，压缩模量 $E_{s1\sim2}=3060\text{kN/m}^2$。取下卧层顶面平均压力 $p_a=90\text{kN/m}^2$，取下卧层原上覆土加权平均浮容重 $\gamma=7\text{kN/m}^2$。

则下卧层顶面平均附加应力为：

$$p_0 = p_a - \gamma D = 20\text{kN/m}^2 \qquad (6\text{-}2\text{-}24)$$

沉降计算示意图如图6-2-10所示。

沉降计算以建筑物中心沉降量最大处作为标准，其简化形式为长度15.0m的横墙下条基与长度为40.0m的纵墙下条基以中点相交，其余条基以影响系数 $\eta=1.5$ 计算。



a. 横墙下条基

$B_1=1.5\text{m}$　$A_1=7.5\text{m}$

$z_1=11.0\text{m}$　$A_1/B_1=5$

$z_1/B_1=7.3$

查表得

$C_3=0.046$

$$S_a = \left[\sum_{i=1}^{n} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i C_i - z_{i-1} C_{i-1}) \times 2 = 1.17\text{cm} \right] \tag{6-2-25}$$

b. 纵墙下条基

$$B_2 = 1.0\text{m} \quad A_s = 20.0\text{m} \quad z_1 = 11.0\text{m} \quad A_2/B_2 = 20 \quad z_1/B_2 = 11$$

查表得

$$C_1 = 0.0815 \quad z_2 = 14.0\text{m} \quad A_2/B_2 = 20 \quad z_2/B_2 = 14$$

查表得

$$C_2 = 0.0692 \quad z_3 = 44.0\text{m} \quad A_2/B_2 = 20 \quad z_3/B_2 = 44$$

查表得

$$C_3 = 0.0510$$

$$S_b = \left[\sum_{i=1}^{n} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i C_i - z_{i-1} C_{i-1}) \times 2 = 1.78\text{cm} \right] \tag{6-2-26}$$

式中 C_i 和 $C_{i=1}$为基础底面分别至第 i 层和第 $i-1$ 层底面范围内的平均附加应力系数。

下卧层的压缩量为：

$$S_2 = m_s \mu (S_a + S_b) = 5.75 \approx 5.8\text{cm} \tag{6-2-27}$$

式中 m_s 是沉降计算经验系数，由于下卧层各层的压缩模量 $E_{s1\sim2}$ 均小于 4000kN/m^2，故取 $m_s = 1.3$。

地基总沉降量为：

$$S = S_1 + S_2 = 8.8\text{cm} \tag{6-2-28}$$

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

高压喷射注浆法是将带有特殊喷嘴的注浆管置于土层预定的深度，以高压喷射流切割地基土体，使固化浆液与土体混合、并置换部分土体，固化浆液与土体产生一系列物理化学作用，水泥土凝固硬化，达到加固地基的一种地基处理方法。

若在喷射固化浆液的同时，喷嘴以一定的速度旋转、提升，喷射的浆液和土体混合形成圆柱形桩体，则称为**高压旋喷法**。

高压注浆法的分类：

高压喷射注浆法施工机械和施工工艺可分为单管法、二重管法和三重管法

单管高压喷射注浆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人土层预定深度后，依靠高压泥浆泵等装置，以20MPa左右的压力，把浆液从喷嘴中喷射出去冲击切割土体，同时借助注浆管的旋转和提升运动，使浆液与土体混合，经过一定时间，形成水泥土固结体，其示意图如表6—3—1中所示。

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

二重管高压喷射注浆法使用双通道的注浆管进行喷射。当双通道的二重注浆管钻进土层的预定深度后，通过在管底部侧面的一个同轴双重喷嘴，同时从外喷嘴射出0.7MPa左右的压缩空气和从内喷嘴喷射出20MPa的高压浆液。在高压浆液流和它外围的环绕空气流共同作用下，土体被切割，随着喷嘴的旋转和提升，浆液与土体混合，经过一定时间形成水泥土固结体，其注浆示意图如表6-3—1中所示。二重管高压喷射流切割土体能力比单管高压喷射流切割土体能力强。

三重管高压喷射注浆法使用分别输送水、气、浆三种介质的三通道的注浆管进行喷射。在以高压泵等高压发生装置产生的40MPa左右的高压水喷射流周围，环绕一股0.7MPa左右的圆筒状气流，进行高压水喷射流和气流同轴喷射冲切土体，在地基土体中形成较大的孔隙，再另外由泥浆泵注入压力为2-5MPa的浆液填充，当喷嘴旋转和提升时，浆液和土体混合，经过一定时间，形成水泥土固结体，如表6-3-1中所示。三重管高压喷射流切割土体能力比双管高压喷射流切割能力更强。因此，采用三重管高压喷射注浆法所形成的水泥土桩直径大。

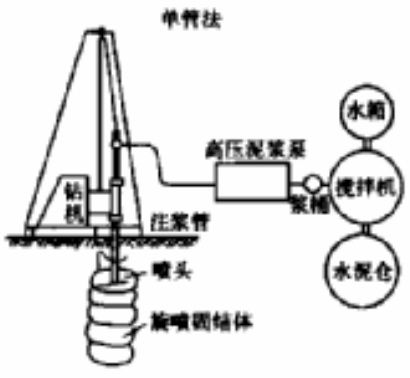
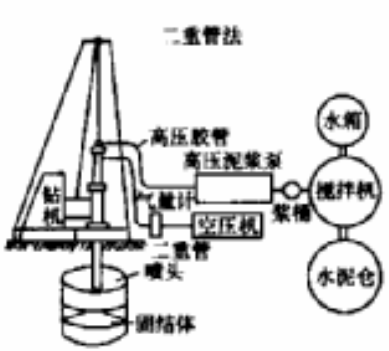
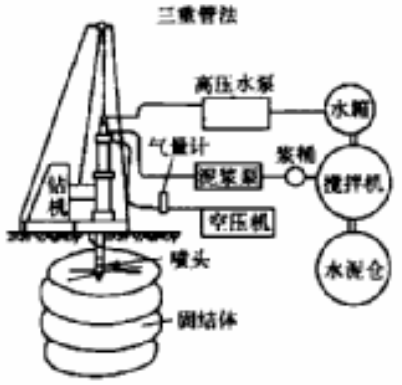
第六章 灌入固化物

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

单管法、二重管法和三重管法比较　　表 6-3-1

项目 \ 工法		单管法	二重管法	三重管法
浆土混合特点		搅拌混合	半置换混合	半置换混合
适用范围		黏性土 $N<5$	黏性土 $N<5$	
		砂性土 $N<15$	砂性土 $N<15$	砂性土 $N<200$
常用压力		20MPa	20MPa	40MPa
高压喷射流		高压浆液流	高压浆液流＋高压气流	高压浆液流＋高压气流
改良土体有效直径（mm）		300～500	1000～2000	1200～2000
改良土体强度（q_u，kPa）	黏性土	500～1000	500～1000	500～1000
	砂性土	1000～3000	1000～3000	1000～3000
示意图				

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

高压喷射注浆法施工顺序

高压喷射注浆法施工顺序如图6-3-1所示

①钻机就位后，

②首先钻孔至设计深度

③然后进行高压喷射。一边喷射，一边旋转、提升，直至设计高度，结束高压喷射。

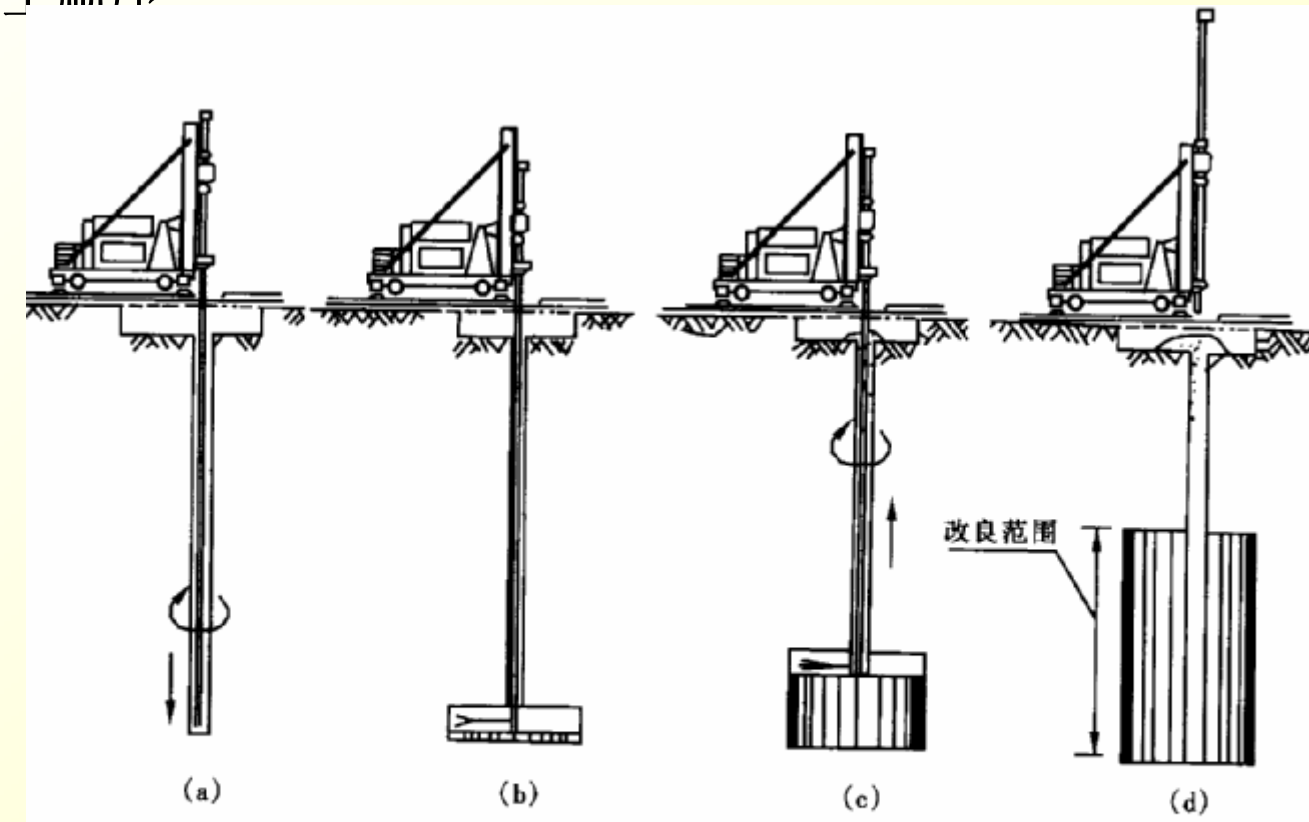


图 6-3-1 高压喷射注浆法施工顺序

(a) 就位并钻孔至设计深度；(b) 高压喷射开始；

(c) 边喷射、边提升；(d) 高压喷射结束准备移位

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

若在高压喷射过程中，钻杆只进行提升运动，钻杆不旋转，称为**定喷**；
在高压喷射过程中，钻杆边提升，边左右旋转某一角度，称为**摆喷**；
在高压喷射过程中，**旋喷**可形成圆柱形固结体，如图6-3-2(a)所示。
摆喷和定喷可形成扇形和片状固结物，如图6-3-2中(c)和(b)所示。
旋喷常用于地基加固，定喷和摆常用于形成止水帷幕。

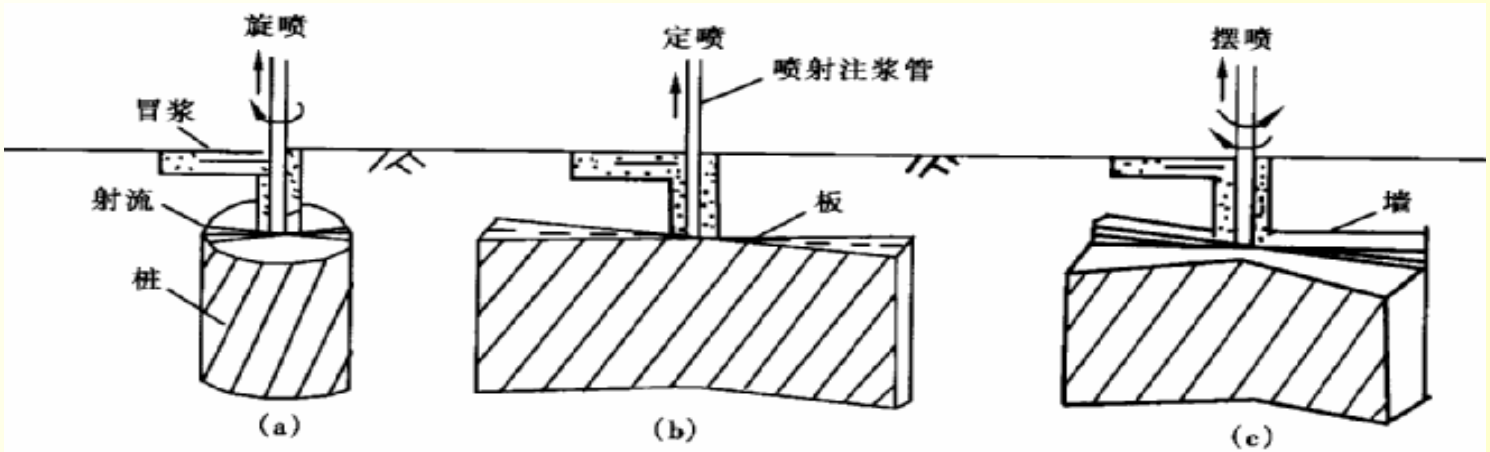


图 6-3-2 旋喷、定喷和摆喷

(a) 旋喷形成圆柱形固结物；(b) 定喷形成片状固结物；
(c) 摆喷形成扇形固结物

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

高压喷射注浆法形成的改良土的有效直径不仅取决于采用的施工方法(单管法、二重管法、三重管法)，还与被改良土的性质和深度有关。一般需通过试验确定，无试验资料时采用二重管法和三重管法施工，改良土体的有效直径分别可参考表6－3－2和表6－3－3所示大小采用。

二重管法改良土体有效直径 **表 6-3-2**

N 值	黏性土	$N<1$	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	
	砂性土	$N\leqslant 10$	$10<N\leqslant 20$	$20<N\leqslant 30$	$30<N\leqslant 35$	$35<N\leqslant 40$	$40<N\leqslant 50$
有效直径（m）	（$0<z\leqslant 25$m）	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
提升速度（min/m）	黏性土	30	27	23	20	16	
	砂性土	40	35	30	26	21	17
浆液喷射（m^3/min）	0.06						

注：z 为改良土体深度。

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

高压喷射注浆法形成的改良土的有效直径不仅取决于采用的施工方法(单管法、二重管法、三重管法)，还与被改良土的性质和深度有关。一般需通过试验确定，无试验资料时采用二重管法和三重管法施工，改良土体的有效直径分别可参考表6－3－2和表6－3－3所示大小采用。

三重管法改良土体有效直径 **表 6-3-3**

N 值	黏性土	—	$N \leqslant 3$	$3 < N \leqslant 5$	$5 < N \leqslant 7$	—	$7 < N \leqslant 9$
	砂性土	$N \leqslant 30$	$30 < N \leqslant 50$	$50 < N \leqslant 100$	$100 < N \leqslant 150$	$150 < N \leqslant 175$	$175 < N \leqslant 200$
有效直径(m)	$0 < z \leqslant 30$	2.0	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
	$30 < z \leqslant 40$	1.8	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
提升速度(min/m)		16	20	20	25	25	25
浆液喷射(m^3/min)		0.18	0.18	0.18	0.14	0.14	0.14

注：z 为改良土体深度。

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

采用高压喷射注浆法加固地基除水泥与土体就地混合形成水泥土外，还有**置换作用**。在施工过程中，正常情况下约有20%的泥浆溢出地面。泥浆中含有水泥和被置换的土体。在高压喷射注浆施工过程中如无泥浆溢出，应检查是否遇到地下水流过大或孔洞带走喷射浆液。在施工过程中如溢出泥浆数量偏大，也应检查施工质量，是否产生未能有效切割土体，浆液未能与土体混合而沿钻杆溢出

溢出泥浆可脱水用于填筑路基等用途。

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

高压喷射注浆法除垂直钻孔喷射外，20世纪肋年代发展了水平高压喷射注浆法，俗称**水平旋喷**。水平高压喷射注浆法就是在土层中水平或小角度俯、仰和外斜钻进成孔，注浆管呈水平状，或与水平成一小角度，喷嘴由里向外移动旋喷、注浆。喷射压力根据设计旋喷直径和土质情况而定，一般在20MPa左右。

水平旋喷多用于隧道工程施工。

水平旋喷施工顺序如图6-3-3所示主要步骤为：

①钻机定位(图6-3-3a)；

②钻孔至设计进尺(图6-3-3b)；

③高压喷射注浆(图6-3-3c)；

④高压喷射注浆结束(图6-3-3d)。

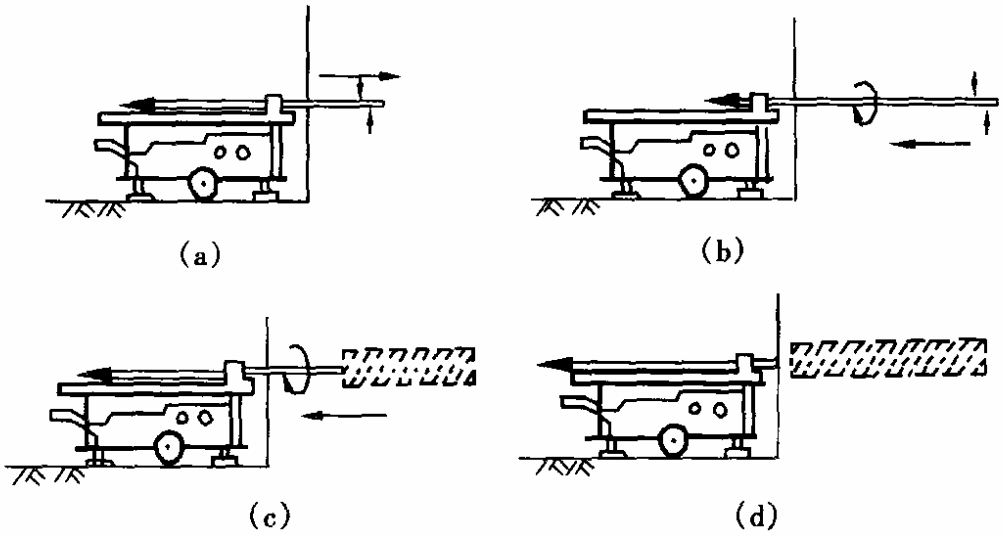


图 6-3-3 水平喷旋工艺流程图

(a) 钻机定位；(b) 钻孔至设计进尺；(c) 高压喷射注浆；(d) 高压喷射注浆结束

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.1 加固机理、分类和适用范围

高压喷射注浆适用于：淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、黄土、砂土、人工填土和碎石土等地基。当地基中含有较多的大粒径块石、坚硬黏性土、大量植物千茎或土体中有机质含量较高时，应根据现场试验结果确定其适用程度。遇地下水流流速过大和已涌水的工程应使用。

压喷射注浆法通过高压喷射流切割土体，使固化剂与土混合，并置换一部分土体，经一系列物理化学作用形成水泥土。高压喷射注浆形成的水泥土比相应的天然土体强度高，，压缩模量大，且渗透系数小。在工程上一般用于形成复合地基以提高地基承载力，减小沉降，或形成止水帷幕用于防渗，也有用于形成支挡结构。

高压喷射注浆水泥土的力学性质 **表 6-3-4**

性质 \ 加固土类	砂　土	黏 性 土	黄　土	砂　砾
最大抗压强度（MPa）	10～20	5～10	5～10	8～20
抗拉强度/抗压强度	1/5～1/10	1/5～1/10	1/5～1/10	1/5～1/10
C（MPa）	0.4～0.5	0.7～1.0		
φ（°）	30～40	20～30		

（引自朱庆林、王吉望，1988）

6.3 高压喷射注浆法

6.3.2 工程应用

（1）加固已有建（构）筑物地基

由于施工设备所占空间较小，可创造条件在室内施工，因此高压喷射注浆法可应用于加固已有建筑物地基。

国内已完成多项工程，取得良好效果。高压喷射注浆法可在室内施工，在已有建筑物基础下设置旋喷桩，形成旋喷桩复合地基(图6—3—4)，以提高地基承载力，减小建筑物沉降。在采用高压喷射注浆法加固已有建筑物地基时，需要重视采取措施减小施工期间的附加沉降。如采取合理安排旋喷桩施工顺序、施工进度，以及采用速凝剂加速水泥土固化等措施。

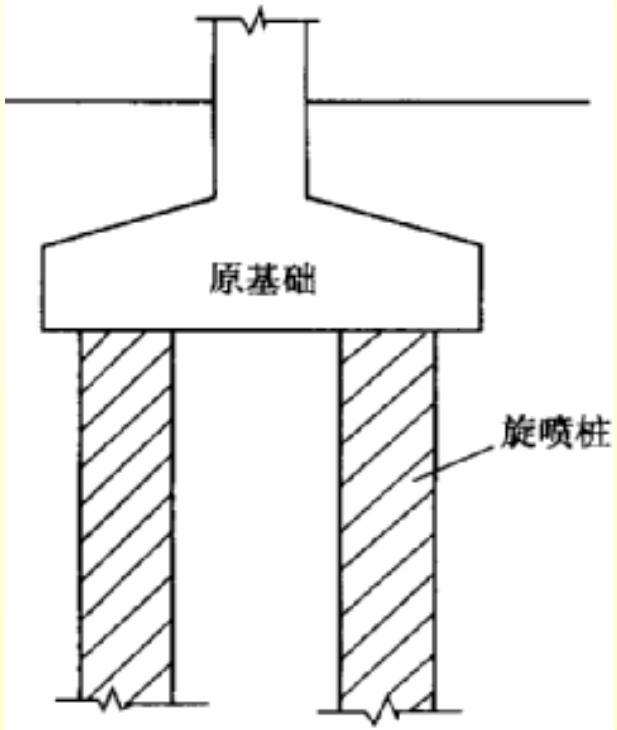


图 6-3-4 旋喷桩复合地基示意图

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.2 工程应用

（2）形成水泥土止水帷幕

采用摆喷和旋喷可以在地基中设置所需要的止水帷幕，在水利工程、矿井工程和深基坑围护工程中得到应用。止水帷幕可以由高压喷射注浆法施工单独形成。在图6-3-5中，图6-3-5(a)表示由摆喷形成的止水帷幕，图6-3-5(b)表示由旋喷形成的止水帷幕，图6-3-5(c)表示由旋喷和摆喷组合形成的止水帷幕。止水帷幕也可由高压喷射注浆法施工形成的水泥土与围护结构中的排桩联合形成。图6-3-5(d)表示由钢筋混凝土桩与旋喷桩联合形成的止水帷幕，图6-3-5(e)表示由钢筋混凝土桩与摆喷形成的止水帷幕。

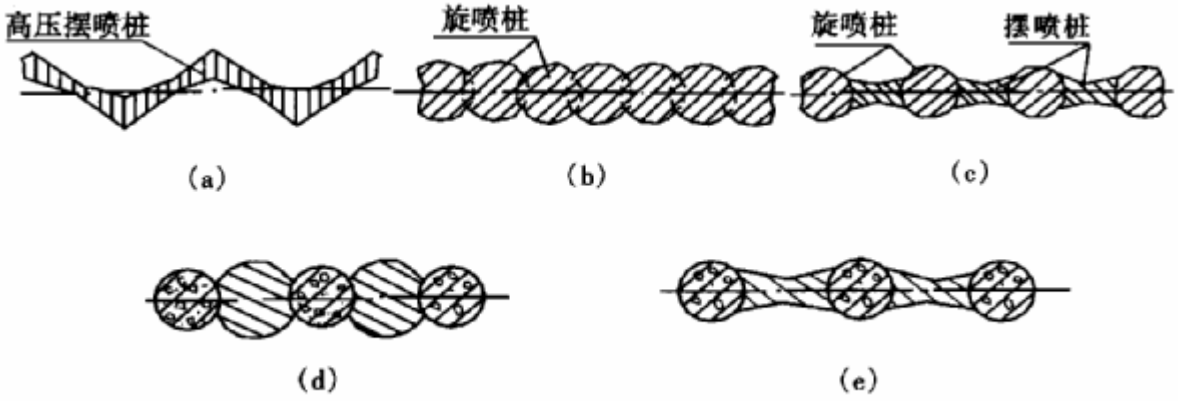


图 6-3-5 止水帷幕平面布置

6.3 高压喷射注浆法

6.3.2 工程应用

(3)应用于基坑开挖工程封底

基坑围护体系中需要采用水泥土封底时可采用高压喷射注浆法施工。水泥土封底既可防止管涌，也可减小基坑隆起，对支护结构还可以起支撑作用。水泥土封底示意图如图6—3—6所示。

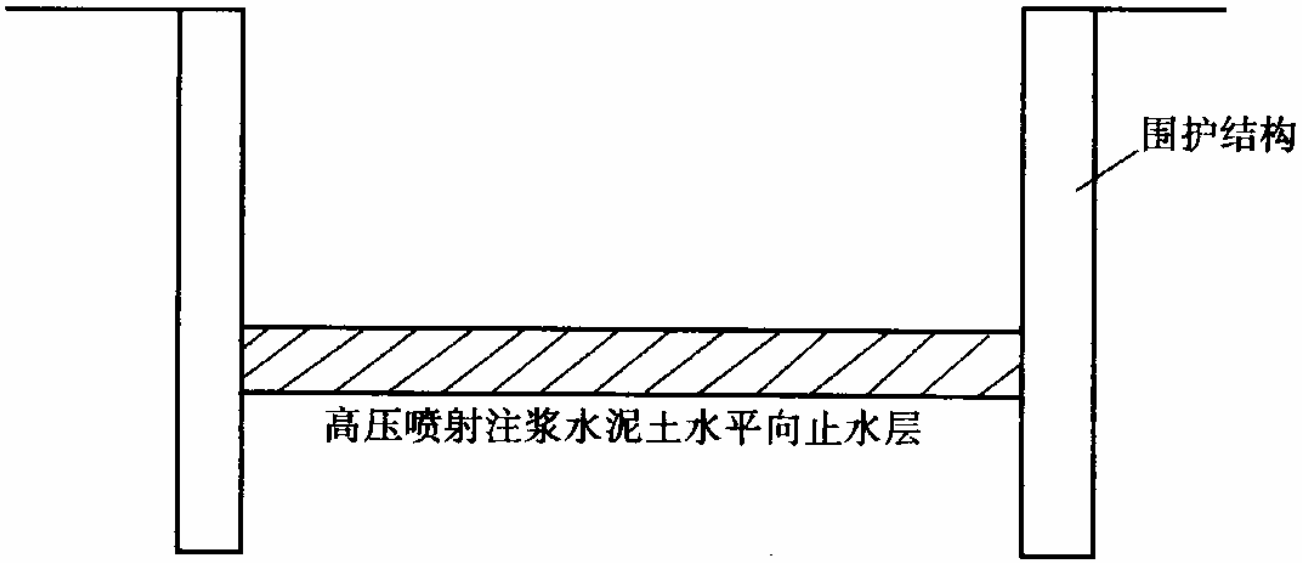


图 6-3-6 水泥土封底在围护体系中的应用

6.3 高压喷射注浆法

6.3.2 工程应用

(4)水平高压喷射注浆法工程应用

水平高压喷射注浆法主要用于地下铁道、隧道、矿山井巷、民防工事等地下工程的暗挖施工及其塌方事故的处理。图6—3—7表示采用水平旋喷形成隧道的水泥土拱支护结构。

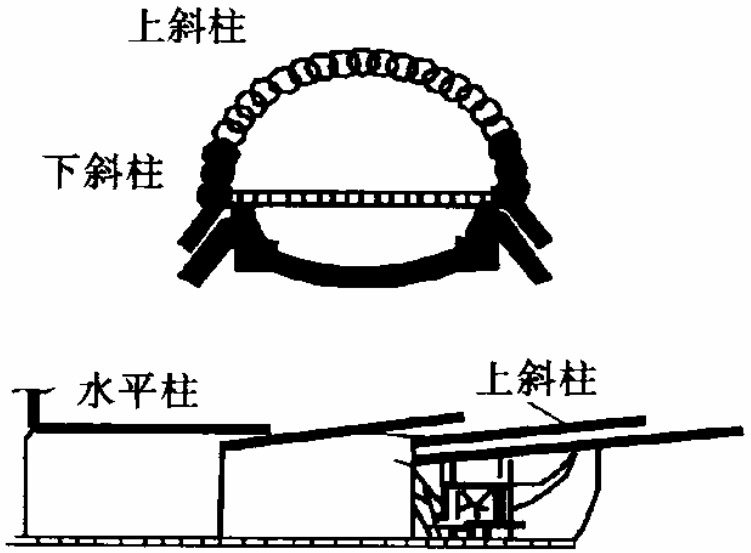


图 6-3-7 水平旋喷形成隧道围护体系

(5)其他工程应用

高压喷射注浆法还可形成水泥土挡土结构应用于基坑开挖支护结构。应用于盾构施工时防止地面下降，也可应用于地下管道基础加固，桩基础持力层土质改良，构筑防止地下管道漏气的水泥土帷幕结构等。

6.3 高压喷射注浆法

6.3.3 高压喷射注浆法设计

高压喷射注浆法设计包括下述几个方面：

(1)根据工程地质条件和地基处理要求决定采用施工方法：单管法、二重管法和三重管法。

(2)根据工程地质条件和选用的施工方法，通过试验确定施工参数、有效改良直径和水泥土力学性质指标。

(3)用于形成复合地基提高地基承载力，减小沉降，设计计算方法同深层搅拌桩复合地基；用于形成止水帷幕防渗，需进行防渗设计。

6.3 高压喷射注浆法

Dr. Han WX

6.3.3 高压喷射注浆法设计

以基坑围护止水帷幕抗管涌验算为例，其示意图如图 6-3-8 所示。

止水帷幕一侧与另一侧水位差为 h，止水帷幕高为 l，基坑深度为 H，则基坑底土体承受的最大渗透力 F 为：

$$F = ir_w = \frac{hr_w}{2(l - H) + h} \qquad (6\text{-}3\text{-}1)$$

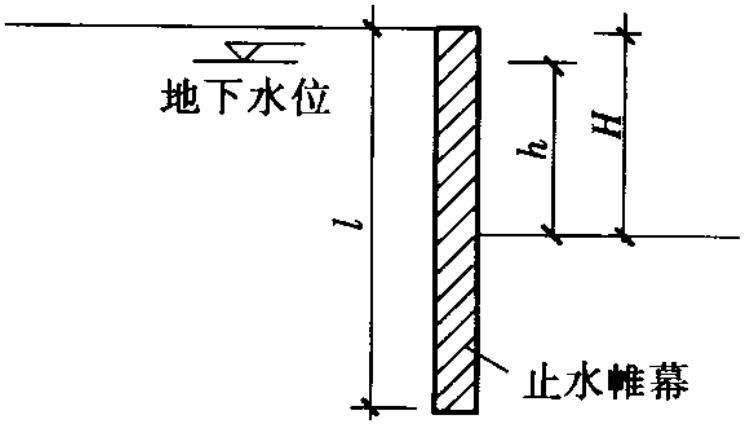


图 6-3-8 抗管涌[illegible]图

式中 i——水力梯度；

r_w——水的重度。

抗管涌安全系数 K_s 的表达式为：

$$K_s = \frac{r'}{F} = \frac{r'[h + 2(l - H)]}{r_w h} \qquad (6\text{-}3\text{-}2)$$

式中 r'——土的有效重度。

根据式（6-3-2）可计算止水帷幕高 l。抗管涌安全系数一般应不小于 1.5～2.5。

6.3 高压喷射注浆法

6.3.4 质量检验

开挖检查、

钻孔取芯、

标准贯入、

载荷试验、

压水试验。

具体工程应采用的检验方法可视其工程要求和应用情况而定。用于形成复合地基提高地基承载力和减小沉降可采用载荷试验，用于形成止水帷幕可采用压水试验等。

6.4 灌浆法

Dr. Han WX

6.4.1 分类和灌浆材料

灌浆法是指将固化浆液注入地基土体，以改善地基土体的物理力学性质，达到地基处理的目的的一类地基处理方法。

灌浆浆液由灌浆材料(主剂)、溶剂(水或其他有机溶剂)及各种附加剂，按一定比例配制而成。

灌浆法的用途：

灌浆法主要用于提高岩土的强度和变形模量，用于降低岩土的渗透性，提高抗渗能力，也用于封填孔洞、堵截漏水，有时还用于建筑物纠偏。

灌浆法的分类：

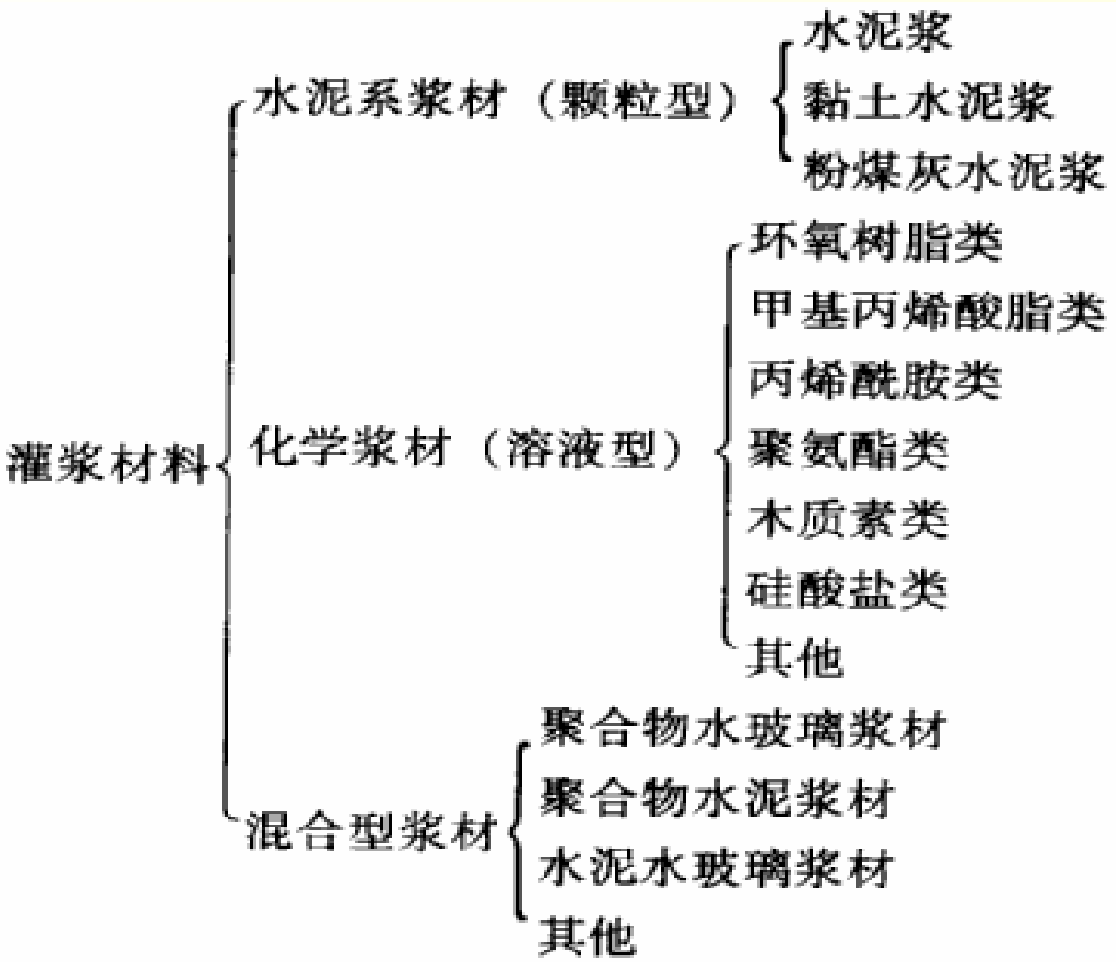
按照灌浆机理，可分为渗人性灌浆、劈裂灌浆、压密灌浆和电动化学灌浆。各种灌浆采用的工艺和材料以及适用范围都有较大差异。

6.4 灌浆法

Dr. Han WX

6.4.1 分类和灌浆材料

灌浆材料按原材料和溶液特性分类如下：



6.4 灌浆法

Dr. Han WX

6.4.1 分类和灌浆材料

灌浆材料按原材料和溶液特性分类如下：



6.4 灌浆法

Dr. Han WX

6.4.1 分类和灌浆材料

灌浆材料按原材料和溶液特性分类如下：

化学浆液常用附加剂视浆液性质不同而异，以聚氨酯浆液为例，常用附加剂如下所示：

- 聚氨酯浆液常用附加剂
  - 增塑剂—邻苯二甲酸二丁酯
  - 稀释剂
    - 丙酮
    - 二甲苯
  - 表面活性剂
    - 吐温
    - 硅油
  - 催化剂
    - 三乙醇胺
    - 三已胺

其他化学浆液常用附加剂这里不一一介绍了，如需要可参阅有关灌浆材料手册。

6.4 灌浆法

6.4.2 渗入性灌浆

渗入性灌浆是指在灌浆压力作用下，浆液克服各种阻力，渗入到地基土层中的孔隙或裂缝中。此时，地基土层结构基本不受扰动和破坏，渗入到地基土层中的浆液在地基中与土体产生一系列物理化学作用，地基土体得到改良，抗剪强度提高，压缩模量增大。

渗入性灌浆适用于地基中存在孔隙或裂缝的地基土层，如砂土地基等。对颗粒型浆液，其颗粒尺寸必须能进入土层中存在的孔隙或裂缝中，因而渗入性灌浆存在浆液可灌性问题。

浆液可灌性常用可灌比值N表示：

对砂砾石地基：

$$N = \frac{D_{15}}{d_{85}} \leqslant 10 \sim 15 \qquad (6\text{-}4\text{-}1)$$

式中 D_{15}——砂砾石中含量为15%的颗粒尺寸；

d_{85}——灌浆材料中含量为85%的颗粒尺寸。

6.4 灌浆法

6.4.2 渗入性灌浆

也可用**渗透系数K来间接评价**，当地基土体渗透系数K>(2—3) ×10^{-1}cm时，可用水泥浆液灌浆；当渗透系数K>(5-6) ×10^{-1}cm时，可用水泥黏土浆液灌浆。

浆液的黏度对渗人性灌浆影响较大。浆液的黏度越大，其流动阻力也越大。因此当浆液黏度较大时，需要较高的压力以克服其流动阻力，而且只能灌注较大的孔隙尺寸。除丙凝等少数浆液外，多数浆液的黏度随时间增加而增加，在灌浆过程中应予以重视。

在渗入性灌浆中，影响浆液扩散范围的因素有地基土层的渗透系数(或裂隙和孔隙尺寸)、浆液的黏度、灌浆压力、灌人时间等。各国学者对灌浆浆液扩散范围提出许多计算理论，如球形扩散理论、柱形扩散理论和袖阀管法理论等。上述理论对天然地层都作了一些简化，而天然地层情况往往比较复杂。因此在工程应用上，一般还是以现场灌浆试验确定灌浆压力、灌浆时间和浆液扩散范围相互之间的关系，并从技术和经济方面进行综合比较分析，然后作出灌浆设计，确定施工参数。

6.4 灌浆法

Dr. Han WX

6.4.3 劈裂灌浆

劈裂灌浆是指依靠较高的灌浆压力，使浆液能克服地基中初始应力和土体抗拉强度，使土体沿垂直于小主应力的平面或土体强度最弱的平面上发生劈裂，使浆液可灌人土体，增大浆液扩散范围，达到土质改质目的的灌浆方法。

对岩石地基，目前常用的灌浆压力尚不能使新鲜岩体产生劈裂，主要是使原有的隐裂隙或微细裂缝产生扩张。

对于砂砾石地基，其透水性较大，浆液渗入将引起超静水压力提高，到一定程度后灌浆引起砂砾石层的剪切破坏，土体产生劈裂，达到劈裂注浆。

对黏性土地基，在具有较高灌浆压力的浆液作用下，土体可能沿垂直于小主应力的平面产生劈裂，浆液沿劈裂面扩散，并使劈裂面延伸。

6.4 灌浆法

6.4.4 压密灌浆

压密灌浆是指在地基中灌人较浓的浆液，浆液迫使注浆点附近土体压密而形成浆泡。开始灌浆压力基本上沿径向扩散，随着浆泡的扩大，灌浆压力的增大，周围土体产生压密。对饱和土，则在土体中产生较大的超孔隙水压力，并产生较大的上抬力。压密灌浆形成的上抬力能使地面隆起，或使建筑物上抬。压密灌浆的过程是用浓浆液置换和挤密土体的过程。

压密灌浆常用于砂土地基加固，黏土地基中若有较好的排水条件也可采用压密灌浆进行加固。

压密灌浆形成的浆泡形状与土的物理力学性质、地基土的均匀性、灌浆压力、灌浆速率等因素有关。浆泡形状在均质地基中常为球形或圆柱形，浆泡横截面直径可达1.0m或更大。离浆泡界面0.3—2.0m以内土体能受到明显的挤密。

有时可利用压密灌浆在地基中设置桩体，达到加固地基的目的。也有利用压密灌浆形成的上抬力，进行建(构)筑物纠倾。

压密灌浆还可用于补偿注浆，以减小基坑开挖、盾构施工等造成的环境影响。

6.4 灌浆法

6.4.5 电动化学灌浆

在地基中插入金属电极并通以直流电，在电场作用下，土中水会从阳极向阴极流动，这种现象称为电渗。

借助于电渗作用，在黏土地基中即使不采用灌浆压力，也能靠直流电将浆液(如水玻璃溶液或氯化钙溶液)注入土体中，达到改良土质的目的。或者将浆液依靠灌浆压力注入到电渗区，通过电渗使浆液扩散均匀，以提高灌浆加固效果。

6.4 灌浆法

6.4.6 灌浆法设计程序

灌浆法加固地基设计一般包括下述程序：

(1)地质调查

探明需处理地层的工程地质和水文地质条件。

(2)选择灌浆方案

根据地质条件、灌浆目的和要求，初步选择灌浆方案。

灌浆方案确定后，通过灌浆试验确定相应的浆材配比及灌浆工艺。

(3)确定灌浆孔位置

灌浆孔位置包括布置形式和孔距。

(4)确定灌浆压力

通常通过工程经验和灌浆试验确定灌浆压力。

6.4 灌浆法

6.4.7 质量检验

灌浆效果检验视灌浆目的不同而异。以堵漏和纠偏为目的的灌浆工程，在施工过程中是否已达到目的就是最好的效果检验。

在灌浆过程中灌浆质量应符合设计要求和施工规范，如灌浆材料的品种规格、浆液配比和性能、钻孔位置和角度、灌浆压力和灌浆量等。在灌浆过程中根据堵漏、纠偏情况发展，不断调整设计参数也是经常的。

以防渗为目的的灌浆工程的效果检验除灌浆质量应符合设计要求和施工规范外，还要通过现场渗透试验检验灌浆效果。

第六章 灌入固化物

思考题与习题

Dr. Han WX

1. 试分析采用灌入固化物加固地基的机理，哪些地基处理方法属于灌入固化物？

2. 简述深层搅拌法的工程应用。

3. 简述深层搅拌桩复合地基设计步骤。

4. 某住宅小区软土地基不能满足设计要求，现决定采用水泥搅拌桩复合地基加固。天然地基承载力特征值为 100kPa，设计承载力特征值要求到 130kPa。设桩长取 15m，桩径取 0.5m，地基土能提供桩周侧阻力为 9.0kPa，搅拌桩桩端承载力可不计，水泥土抗压强度为 1.8MPa，桩间土承载力折减系数取 0.5，试进行水泥搅拌桩复合地基设计。

5. 什么叫旋喷、摆喷和定喷？简述它们的主要工程应用。

6. 在高压喷射注浆施工过程中，为什么会产生冒浆现象？

7. 请分析渗入性灌浆、劈裂注浆、压密注浆区别，并说明它们的主要工程应用。