

ICS 27.140  
P 59  
备案号: J923—2009

DL

中华人民共和国电力行业标准  
P DL/T 5425—2009

## 深层搅拌法技术规范

Technical specification for deep mixing method



2009-07-22发布

2009-12-01实施

中华人民共和国国家能源局 发布

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	2
3 术语和定义 .....	3
4 总则 .....	5
5 设计 .....	6
5.1 一般规定 .....	6
5.2 复合地基设计 .....	6
5.3 防渗墙设计 .....	10
5.4 支护挡墙设计 .....	11
6 施工 .....	12
6.1 一般规定 .....	12
6.2 施工设备 .....	12
6.3 施工准备 .....	13
6.4 工艺试验 .....	13
6.5 施工作业 .....	14
7 施工质量控制 .....	16
8 质量检验与验收 .....	18
附录 A (资料性附录) 水泥土室内试验 .....	21
附录 B (资料性附录) 深层搅拌施工记录 .....	22
条文说明 .....	27

## 前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于印发 2006 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2006〕1093 号）要求制定的。

深层搅拌技术在水电水利行业已被广泛应用，并积累了大量的经验。为了促进水电水利深层搅拌法技术的进步和发展，使深层搅拌法处理工程的设计、施工、质量控制、质量检验与验收规范化，确保工程质量，制定本标准。

本标准的附录 A、附录 B 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准主要起草单位：北京振冲工程股份有限公司。

本标准参加起草单位：长江水利委员会长江工程建设局。

本标准主要起草人：刘勇、熊进、刘保平、罗恒凯、王满兴、于洪治、李晓力、孙国伟、李明福、黄毅、姜本红、陈晨、陈兆霞、张新年、刘顺华、宋红英、占世斌、郑继、胡超、朱兰花、邹启新、全胜、路彩霞。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心（北京市白广路二条一号，100761）。

## 1 范 围

本标准规定了深层搅拌法地基加固、防渗和支护挡墙的设计、施工、质量控制、检验与验收的技术要求。

本标准适用于以水泥浆为主要固化剂的深层搅拌法施工处理的水电水利工程，其他工程可参照执行。



## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB 50011 建筑抗震设计规范
- GB 50202 建筑地基基础工程施工质量验收规范
- GB 50286 堤防工程设计规范
- GB 50287 水利水电工程地质勘察规范
- DL 5073 水工建筑物抗震设计规范
- DL 5180 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准
- JGJ 120 建筑基坑支护技术规程
- SL 252 水利水电工程等级划分及洪水标准

### 3 术语和定义

下列术语和定义使用于本标准。

#### 3.0.1

**深层搅拌法 deep mixing method**

利用深层搅拌机械将水泥浆等材料与土体强制搅拌，从而在土体内产生物理—化学反应，形成具有整体性、水稳定性和一定强度的增强体，和原土体构成复合地基、防渗墙或挡墙的施工方法。

#### 3.0.2

**搅拌桩 deep mixing column**

深层搅拌法处理土体后，由水泥浆等材料和土体共同形成的、具有整体性和水稳定性的柱状增强体。

#### 3.0.3

**水泥土墙 column wall**

由连续套接的水泥土搅拌桩组成的复合增强体。

#### 3.0.4

**复合地基 composite subgrade**

部分土体被增强或被置换，而形成的由地基土和增强体共同承担荷载的人工地基。

#### 3.0.5

**复合土体 composite soil**

复合地基中，增强体与周围地基土组成的等效土体。

#### 3.0.6

**水泥掺入比 cement/soil ratio**

深层搅拌增强体内水泥与原状土体的质量比值。

DL/T 5425—2009

3.0.7

**先导孔** pilot hole

在进行深层搅拌施工前，为确定或复核增强体设计下限深度和地层情况所进行的加密勘探孔。

## 4 总 则

4.0.1 采用深层搅拌法应根据建（构）筑物的技术要求、建设场地工程地质条件、搅拌机具和工艺，进行可行性和经济合理性论证。

4.0.2 采用深层搅拌法的建（构）筑物级别划分按 DL 5180、SL 252、GB 50286 的规定确定。

4.0.3 深层搅拌法适用的地层范围：

1 适用于黏性土、粉土、砂土，以及黄土、淤泥质土和淤泥、素填土等土层。

2 对于欠固结的淤泥质土和淤泥，当加固后的地基承担竖向荷载时，应通过试验确定本法的适用性。

3 对于泥炭质土、有机质土、塑性指数大于 25 的黏土、含砾直径小于 50mm 的砂砾层，以及地下水具有腐蚀性时和无工程经验的地区，应通过现场试验确定本法的适用性。

4 适用深度为 25m 以内的深层搅拌法施工，处理深度超过 25m 时应进行试验论证。

4.0.4 当选定采用深层搅拌法时，应认真搜集处理区域内的岩土工程资料。重点是各种土层的厚度和组成，软土层的分布范围、有机质含量、分层情况，防渗工程中透水层及相对不透水层位置，地下水位及侵蚀性，土的物理力学性质等，并按建（构）筑物级别有区别地进行现场试验。

4.0.5 施工前应进行工艺试验，经确认施工工艺满足工程质量要求后，才能进行工程施工。

4.0.6 采用深层搅拌法进行地基加固、防渗和挡墙支护时，除应遵守本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 5 设计

### 5.1 一般规定

5.1.1 深层搅拌法形成的水泥土增强体，可作为竖向承载的复合地基、防渗墙和基坑工程支护挡墙等。增强体形状可分为柱状、壁状、格栅状或块状等。

5.1.2 设计前应取拟加固土进行室内掺入比试验，根据被加固土中最软弱土层或透水土层的性质选择合适的固化剂与外掺剂，为设计确定配比参数。

5.1.3 宜选用强度等级为 32.5 及以上的通用硅酸盐水泥，特殊情况下可根据加固土体性质及地下水侵蚀性情况选用不同类型的水泥。水泥掺入比可为 7%~20%，特殊情况可通过试验提高掺入比。可选择早强、缓凝、减水以及适合当地土质的外掺剂。

5.1.4 水泥土的抗压强度、压缩模量、渗透系数等试验龄期宜取 90d。

### 5.2 复合地基设计

5.2.1 复合地基设计应根据建（构）筑物对地基承载力、变形和稳定性的要求，确定搅拌桩的置换率和长度。

5.2.2 单桩承载力应通过现场载荷试验确定。试验前可参照类似地层条件工程估算，或按式（5.2.2-1）和式（5.2.2-2）计算，并取其较小值。

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (5.2.2-1)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (5.2.2-2)$$

式中:

- $R_s$ ——单桩竖向承载力特征值, kN;
- $u_p$ ——桩的周长, m;
- $n$ ——桩长范围内所划分的土层数;
- $q_{si}$ ——桩周第  $i$  层土的侧阻力特征值, kPa; 淤泥可取 5kPa~8kPa; 淤泥质土可取 8kPa~12kPa; 软塑状的黏性土可取 12kPa~18kPa; 可塑状态的黏性土可取 18kPa~24kPa;
- $l_i$ ——桩长范围内第  $i$  层土的厚度, m;
- $\alpha$ ——桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取 0.4~0.6, 桩端天然土承载力高时取高值;
- $q_p$ ——桩端地基土未经修正的承载力特征值, kPa, 可按 GB 50007 的有关规定确定;
- $A_p$ ——搅拌桩的截面积,  $m^2$ ;
- $\eta$ ——桩身强度折减系数, 0.25~0.33;
- $f_{cu}$ ——与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7mm 或边长 50mm 的立方体), 在标准养护条件下 90d 龄期的立方体抗压强度平均值, kPa。

5.2.3 竖向承载水泥土搅拌桩复合地基的承载力特征值应通过现场单桩或多桩复合地基载荷试验确定。试验前可按式(5.2.3)估算。

$$f_{spk} = m \frac{\bar{R}_s}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (5.2.3)$$

式中:

- $f_{spk}$ ——复合地基承载力特征值, kPa;
- $m$ ——搅拌桩的面积置换率, %;
- $\beta$ ——桩间土承载力折减系数, 当桩端为软土时, 取  $\beta=0.5 \sim 1.0$ ; 当桩端为硬土时, 取  $\beta < 0.5$ ; 当不考虑桩间软

土作用时, 取  $\beta=0$ ;

$f_{sk}$  ——处理后桩间土承载力特征值, kPa, 可取天然地基承载力特征值。

5.2.4 加固设计时可根据地基承载力要求, 按式 (5.2.4) 估算搅拌桩的面积置换率。

$$m = \frac{f_{spk} - \beta f_{sk}}{\frac{R_a}{A_p} - \beta f_{sk}} \quad (5.2.4)$$

5.2.5 搅拌桩平面布置可根据上部结构特点, 采用柱状、壁状、格栅状或块状等加固形式, 一般只需在上部结构物基础范围内布桩, 桩数可按式 (5.2.5) 计算, 独立基础下的桩数不宜少于 3 根。柱状加固可采用正方形、等边三角形等布桩型式。

$$N = \frac{mA}{A_p} \quad (5.2.5)$$

式中:

$N$  ——布桩总数, 根;

$A$  ——上部结构物基础底面积,  $m^2$ 。

5.2.6 在搅拌桩处理范围以下存在软弱下卧层, 当搅拌桩置换率较大 (一般  $m>20\%$ ) 而且不是单行排列时, 应将搅拌桩群体和桩间土视为一个复合土体, 用式 (5.2.6) 进行下卧层地基强度的验算:

$$P_b = \frac{f_{spk}A + G - A_s q_s - f_{sk}(A - A_1)}{A_1} < f_z \quad (5.2.6)$$

式中:

$P_b$  ——复合土体底面压力, kPa;

$G$  ——复合土体自重, kN;

$q_s$  ——桩周土侧阻力特征平均值, kPa;

$A_s$  ——复合土体的侧表面积,  $m^2$ ;

$A_1$  ——复合土体底面积,  $m^2$ ;

$f_x$ ——复合土体底面经修正后的地基承载力特征值, kPa。

5.2.7 搅拌桩复合地基的沉降包括桩群体的压缩变形和桩端下未加固土层的压缩变形之和。

1 桩群体复合土层的压缩变形  $S_1$  可按式 (5.2.7-1) 计算。

$$S_1 = \frac{(P_x + P_{dl})L}{2E_{sp}} \quad (5.2.7-1)$$

式中:

$P_x$ ——桩群体复合土层顶面的附加压力值, kPa;

$P_{dl}$ ——桩群体复合土层底面的附加压力值, kPa;

$L$ ——实际桩长;

$E_{sp}$ ——桩群体复合土层的压缩模量, kPa, 可按式 (5.2.7-2) 计算。

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (5.2.7-2)$$

式中:

$E_p$ ——搅拌桩的压缩模量, 可取  $(100 \sim 120)f_{cu}$ , kPa, 对桩较短或桩身强度较低者可取低值, 反之可取高值;

$E_s$ ——桩间土的压缩模量, kPa, 可取桩长范围内土层压缩模量的加权平均值。

2 桩端下未加固土层的压缩变形  $S_2$  可按 GB 50007 中的分层总和法进行计算。

5.2.8 竖向承载搅拌桩复合地基应在基础和桩之间设置垫层。垫层厚度可取 200mm~300mm, 其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等, 最大粒径不宜大于 20mm。但对基础有防渗要求的建筑物, 应采用低强度等级的素混凝土垫层或有一定强度的水泥土垫层。采用水泥土垫层时土料宜使用黏性土, 水泥掺量不应小于 20%, 并保证水泥土搅拌的均匀性及铺设的施工质量。

5.2.9 竖向承载搅拌桩复合地基中的桩长超过 10m 时, 在全桩水泥总掺量不变的前提下, 桩身上部三分之一桩长范围内可适当增



加水泥掺量及搅拌次数；桩身下部三分之一桩长范围内可适当减少水泥掺量。

### 5.3 防渗墙设计

5.3.1 防渗墙的设计应按建（构）筑物的防渗要求，确定墙体的位置、厚度、深度以及水泥土的性能指标。

5.3.2 防渗墙应布置在堤（坝）轴线迎水侧。当防渗墙布置于堤（坝）脚时，应保证与堤（坝）体防渗体可靠连接，同时应考虑施工作业面宽度。

5.3.3 防渗墙的厚度应根据作用水头、水泥土材料特性、地基性状等因素确定。设计时可按式（5.3.3）进行简化计算，以初步确定墙厚。

$$S = \eta_j \frac{\Delta H}{[J]} \quad (5.3.3)$$

式中：

$S$  ——有效墙厚，m；

$\Delta H$  ——墙体两侧水头差，m；

$[J]$  ——水泥土允许比降，可取破坏比降的  $1/3 \sim 1/2$ ；

$\eta_j$  ——系数，可取  $1.1 \sim 1.4$ 。

水泥土防渗墙最小厚度不宜小于 150mm。

5.3.4 防渗墙深度应经渗流计算确定。其中封闭式、半封闭式防渗墙，墙体应进入不透水或相对不透水层  $0.5\text{m} \sim 1.0\text{m}$ 。悬挂式防渗墙在堤防中可用于堤身、堤身与堤基接触面以及为延长渗径的处理。

5.3.5 防渗墙的墙顶可根据上部结构物的要求，采取黏土回填或浇筑混凝土等方式与上部结构连接。

5.3.6 防渗墙墙体渗透系数宜小于  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，允许比降不宜小于 50。

5.3.7 防渗墙的厚度、深度、渗透系数等主要指标确定后，应选取代表性断面进行渗流分析计算，以确定所选指标是否满足渗透稳定要求。

#### 5.4 支护挡墙设计

5.4.1 水泥土墙适用于开挖深度小于 7m 的支护挡墙。

5.4.2 水泥土挡墙结构可布置为格栅、块状、壁状等型式。搅拌桩的搭接长度不宜小于 100mm；当有防渗要求时不宜小于 150mm；在土质较差时不宜小于 200mm。

5.4.3 水泥土支护挡墙应优先选用大直径钻头设备施工。当有防渗要求时，应选用多头钻设备施工。

5.4.4 水泥土挡墙支护结构应按重力式挡墙设计，可按照 JGJ 120 中有关条文进行计算。

1 当计算的厚度和嵌固深度小于 0.4 倍开挖深度时，宜取 0.4 倍开挖深度。

2 桩长应超过危险滑弧以下 2m。

3 在水泥土强度小于 0.5MPa 时，还需进行水泥土挡墙墙身应力验算。根据验算结果，对水泥土挡墙厚度及水泥土掺入比进行修正。

4 支护挡墙抗倾覆安全系数应不小于 1.5，抗滑动稳定性安全系数应不小于 1.3，整体稳定性安全系数应不小于 1.25。

5.4.5 当坑底为饱和软土时，应进行坑底抗隆起验算。有渗流时尚应进行渗流稳定验算。

## 6 施 工

### 6.1 一 般 规 定

6.1.1 施工前应取得施工区域的地质资料，了解不良地质情况及地下障碍物，并应采取相应措施。

6.1.2 施工前应制订施工组织设计；对施工人员做好安全、技术与质量交底工作。技术工种操作人员应持证上岗。

6.1.3 为复核地层情况，确定满足设计要求的增强体下限深度，必要时可布设先导孔。先导孔间距以 50m 为宜，特殊地质可适当加密。先导孔应深入设计增强体下限深度以下 5m。

### 6.2 施 工 设 备

6.2.1 深层搅拌法施工应根据工程地质条件与设计参数选用不同形式或功率的深层搅拌设备。水泥土防渗墙施工机械宜采用多头深层搅拌施工设备。

6.2.2 搅拌头翼片的枚数和宽度、翼片与搅拌轴的夹角、搅拌头的回转数、提升速度应相匹配。

6.2.3 深层搅拌设备应具有：

- 1 主驱动电动机的工作电流显示装置。
- 2 主机调平控制装置、桩架立柱垂直度调整装置。
- 3 桩架立柱下部装有搅拌轴的定位导向装置。
- 4 主卷扬机无级调速功能。
- 5 主卷扬机采用电动机驱动的，应有电动机工作电流显示装置；主卷扬机采用液压驱动的，应有工作油压显示装置，或具有钢丝绳的工作拉力显示装置。

6 在搅拌深度超过 20m 时，须在搅拌轴中部位位置的立柱导

向架上安装移动式定位导向装置。

6.2.4 注浆泵的额定工作压力宜大于 0.5MPa，排浆量应满足施工工艺参数需要，工作流量应可调节。

6.2.5 施工设备应配备流量仪、深度仪等自动计量仪器。

### 6.3 施 工 准 备

6.3.1 深层搅拌法施工场地应平整，低洼时应回填素填土，施工工作面高程应高于设计桩（墙）顶高程 0.3m~0.5m。水泥土防渗墙施工前应沿施工轴线开挖导向沟，沟深 0.5m~1.0m，宽 0.5m。处理地上、地下设施及障碍物。

6.3.2 施工前应进行施工测量放样。

6.3.3 施工前应做好施工机具准备，进行机械组装和试运转。施工前应测定注浆泵排浆量、水泥浆经输浆管路到达喷浆口时间以及提升速度等参数。

6.3.4 施工使用的固化剂和外掺剂，应通过室内试验确定满足工程设计指标要求的掺入比，水泥土室内试验参见附录 A。水泥浆液水灰比宜为 0.5~2.0，复合地基加固可取 0.5~1.2，防渗工程和支护工程可取 0.8~2.0。

6.3.5 固化剂浆液应按预定的配比拌制，制备好的浆液不得离析。浆液倒入集料斗时应加筛过滤。

6.3.6 拌制浆量以及固化剂和外掺剂的用量、拌浆及存储时间等应进行记录。

### 6.4 工 艺 试 验

6.4.1. 在施工前应根据设计要求选择有代表性的地层进行工艺试验。试验内容应包括：

- 1 搅拌桩机钻进深度、桩底高程、桩顶高程。
- 2 水泥浆液水灰比。
- 3 搅拌桩机转速、下钻和提升速度。

- 4 注浆泵压力。
- 5 输浆量及每延米桩体注浆量。
- 6 冲水或注水下钻，复搅复喷及其部位等。

6.4.2 复合地基工艺试验，搅拌桩应不少于3根；防渗墙和支护挡墙工艺试验应形成轴线长为3m~5m的墙体。

6.4.3 工艺试验完成7d后，应进行浅部开挖，观察桩体均匀性，检测桩径、墙厚、桩位偏差及桩（墙）间搭接等是否满足设计要求。

## 6.5 施 工 作 业

6.5.1 深层搅拌法用于地基加固和支护挡墙时，施工工序因施工设备的不同而有差异，其常规工序“二喷三搅”为：

- 1 搅拌机就位、调平。
- 2 钻进下沉至设计加固深度。
- 3 边喷浆、边搅拌提升直至预定的停浆面。
- 4 根据设计要求，重复搅拌下沉至设计加固深度。
- 5 根据设计要求，喷浆或仅搅拌提升直至预定的停浆面。
- 6 停机移位。

6.5.2 深层搅拌法用于防渗墙施工时，施工方式有一次成墙、二次成墙等方式，工序为：

- 1 搅拌机就位、调平。
- 2 钻进下沉至设计加固深度。
- 3 边喷浆、边搅拌提升直至预定的停浆面。
- 4 根据设计要求，重复搅拌下沉至设计加固深度。
- 5 根据设计要求，喷浆或仅搅拌提升直至预定的停浆面。
- 6 纵向移动机械，按设计要求尺寸搭接，就位、调平。
- 7 重复本条1~5的工作步骤，完成第二序桩。

6.5.3 为保证搅拌桩的垂直度，起吊设备应保持平稳和导向架垂直。

6.5.4 搅拌桩机预搅下沉时,根据土体条件和工艺试验选用钻进下沉、喷浆搅拌下沉、适量冲水搅拌下沉。

6.5.5 施工参数应符合工艺试验所确定的参数。

6.5.6 施工过程中应连续供浆。

6.5.7 因故停工,按如下方法进行处理:

1 停工时间不超过 8h~24h,恢复施工时宜将搅拌桩机下沉至停浆搅拌点以下 0.5m,再搅拌提升。

2 若停工时间较长,无法下沉至停浆搅拌点以下 0.5m 时,应使下一序桩(墙)与前序桩在一侧或两侧搭接,搭接长度不小于两根桩径。对于重要的防渗墙,还应在搭接桩间钻孔灌注水泥砂浆连接。

6.5.8 搅拌桩施工时,停浆面应高于设计桩顶高程 300mm~500mm,在桩体凝固后,应将高出部分人工凿除。

6.5.9 施工记录应有专人负责,施工记录格式参见附录 B。

6.5.10 水泥土防渗墙与已有建筑物之间的连接可采用高压喷射注浆、钻孔回填黏土或灌注水泥砂浆等方式。

## 7 施工质量控制

7.0.1 施工单位在开工前应建立质量保证体系,包括组建质量检查机构,配备质检人员和必要的检测设备,并制订质量检查制度及实施办法等。

7.0.2 深层搅拌法施工质量控制应以过程控制为主,施工过程中应保证机具平稳,并严格控制垂直度、回转速度、提升速度、水泥浆液浓度、供浆流量等参数,保证掺入比满足设计要求且搅拌均匀。

7.0.3 水泥质量应符合 GB175 规定。搅拌水泥浆液所用水应符合混凝土拌和用水要求。选用水泥的强度等级不得低于 32.5 级,并按批次做质量检测。

7.0.4 根据土质条件和工程要求选用具有早强、减水作用的外加剂时,外加剂产品应有生产许可证和产品合格证,并应严格按室内试验和现场试验确定的外加剂的种类和用量进行控制。

7.0.5 搅拌设备应由有资质的生产厂家生产,应配备经计量认证的监测计量仪器。

7.0.6 搅拌叶片直径每个单元工程应检测一次,偏差应控制在 3% 以内。回转速度、提升速度偏差应控制在 5% 以内。

7.0.7 单桩施工搅拌桩的垂直偏差不得超过 1%,桩位偏差不得大于 50mm;有搭接要求时垂直度偏差不得超过 0.5%,桩位偏差不得大于 20mm。垂直度及桩位偏差,每个机位均应检测。

7.0.8 成桩直径和桩长不得小于设计值。对于防渗墙施工,考虑垂直度偏差、桩位偏差达到允许的最大值时,能保证墙体有效墙厚满足设计要求。

7.0.9 水泥浆材料配制称量误差应控制在 1% 以内。水泥浆存放时宜控制浆体温度为 5℃~40℃,当气温在 10℃ 以下时浆液存放

不应超过 4h，气温在 10℃ 以上时，不应超过 3h。超过存放时间时，应作弃浆处理。

7.0.10 搅拌机喷浆提升（下沉）速度、回转速度应符合施工工艺的要求。施工中应定时检查计算掺入比，发现不满足规定时应及时修正。

7.0.11 施工过程中应详细记录搅拌钻头每米下沉（提升）时间、注浆与停浆的时间。记录深度误差不得大于 50mm，时间误差不得大于 5s。

7.0.12 施工记录应及时、准确、完整、清晰。



## 8 质量检验与验收

8.0.1 施工完成后,对于竖向承载桩,应对桩径、桩长、桩位偏差、桩体抗压强度、桩体均匀性、复合地基承载力进行检验,必要时进行压缩模量检验;对于堤坝防渗墙和支护挡墙,应重点检验墙体深度、墙体抗压强度、渗透系数、允许比降、墙体有效厚度,以及墙体均匀性、完整性、连续性等指标。

8.0.2 竖向承载桩可采用如下方法进行质量检验:

1 成桩后 3d 内,可用轻型动力触探 (N10) 检查每米桩身的均匀性。检验数量为施工总桩数的 1%,且不少于 3 根。

2 采用浅部开挖桩头 (深度宜超过停浆面下 0.5m),目测检查搅拌的均匀性,量测成桩直径,检查量为总桩数的 5%。

3 竖向承载水泥土搅拌桩地基竣工验收时,承载力检验应采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验。

4 载荷试验应在桩身强度满足试验荷载条件时并宜在成桩 90d 后进行。检验数量为桩总数的 0.5%~1%,且每项单体 (项) 工程不应少于 3 点。

5 基槽开挖后,应检验桩位、桩数、桩径与桩体质量,同时取样进行室内强度试验。

8.0.3 竖向承载桩质量检验标准和方法见表 8.0.3。

表 8.0.3 竖向承载桩完工质量检验表

序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查方法
1	地基承载力	设计要求	载荷试验
2	桩体强度	设计要求	钻孔 (开挖) 取芯检测
3	桩顶标高	设计要求	水准仪 (最上部 500mm 不计入)
4	桩径	设计要求	钢尺测量
5	桩长	不小于设计桩长	钻孔或物探

8.0.4 对于防渗墙和挡墙可采用如下方法进行质量检验：

1 钻孔检查。成墙后沿墙体轴线布设检查钻孔。通过所取芯样对墙体均匀性、完整性、连续性进行评价，利用芯样进行抗压强度、渗透系数、允许比降等室内试验。堤防工程每 300m~500m 抽检一孔，不足 300m 也应布设一孔，坝体防渗墙和挡墙可适当加密。取芯后的钻孔应采取可靠措施封填。

2 开挖检查。沿墙体轴线布设开挖检查点，每处开挖长度 3m~5m、深 2.5m~4.0m，检查墙体完整性和均匀性、桩体间连接质量和墙体厚度，并取样室内进行抗压强度、渗透系数、允许比降等试验。堤防工程每 500m 开挖一处，不足 500m 也应布设一处。坝体防渗墙可适量布设开挖检查点。

3 无损检测。必要时可利用无损检测方法对墙体连续性、完整性进行检查。在无损检测中发现异常的部位，应采用钻孔取芯法或开挖进行验证。

4 原型观测（安全监测）成果分析。必要时，可进行原型观测，利用布设的安全监测设施监测的成果资料，对墙体整体防渗效果及位移变形进行综合分析。

5 如不符合设计要求，应采取有效补强措施。

8.0.5 防渗墙和挡墙质量检验标准和方法见表 8.0.5。

表 8.0.5 防渗墙和挡墙质量检验表

序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查方法
1	墙体强度	设计要求	钻孔（开挖）取样检测
2	渗透系数	设计要求	钻孔（开挖）取样检测
3	桩顶高程	设计要求	水准仪测量
4	桩径	设计要求	钢尺测量
5	搭接	满足最小有效墙厚要求	钢尺测量
6	桩长	不小于设计桩长	钻孔或物探

DL/T 5425—2009

8.0.6 竣工验收应具备下列文件和资料：

- 1 工程勘察资料。
- 2 工程设计文件。
- 3 施工过程记录、质量检查及工序验收资料、各种原材料试验资料、水泥浆试验资料、室内掺入比试验资料、现场试桩资料、原型观测资料、钻孔检查资料、开挖检查资料。
- 4 施工大事记。
- 5 施工质量自检及评定记录。
- 6 施工质量缺陷记录、缺陷分析及处理结果。
- 7 质量事故处理报告。
- 8 竣工报告及竣工图。
- 9 工程质量检测报告。
- 10 其他有关资料。

附录 A  
(资料性附录)  
水泥土室内试验

A.1 水泥土室内试验目的

A.1.1 确定满足工程要求的水泥土材料配比。

A.1.2 测定材料及试件性能参数。

A.2 试块的制作和养护

A.2.1 室内水泥土掺入比试验。

在施工现场选取天然土样(密封)及施工实际使用的水泥、外掺剂和拌和水,制备样品,在标准养护条件下养护。抗压强度试块尺寸为  $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$  或  $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ; 渗透系数的试块尺寸为上口直径 70mm, 下口直径 80mm, 高度为 30mm。

A.2.2 现场取样方法

A.2.2.1 开挖取样,按照上述尺寸加工制作成试块。

A.2.2.2 钻孔取芯样,按高径比为 1:1 制备样品。

A.2.2.3 试样养护,在标准养护条件下养护。

A.3 试验内容

A.3.1 抗压强度试验

A.3.1.1 从养护室取出到达要求龄期的试块,称重后用压力试验机或膨胀压缩仪(应根据试块强度选择合适的试压设备)测定无侧限抗压强度。

A.3.1.2 用作材料检验的试块一般只需进行短龄期的强度试验,短期强度试验满足要求的材料即可投入工程使用。

A.3.2 渗透系数测定

试验前先将试块饱水 48h,使用砂浆抗渗仪进行试验,根据达西定律,得出试块的渗透系数。

附录 B  
(资料性附录)  
深层搅拌施工记录

B.1 深层搅拌桩施工记录表见表 B.1。

表 B.1 深层搅拌桩施工记录表

第 页 共 页

工程名称 水泥标号 水灰比 年 月 日

日期	桩号	施工 工序	每米下沉或提升时间															开始时间	终止时间	工艺时间	来浆时间	停浆时间	总喷浆时间	总施工时间	材料用量	备注		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15											
		预搅下沉																										
		喷浆提升																										
		重复下沉																										
		重复提升																										
		预搅下沉																										
		喷浆提升																										
		重复下沉																										
		重复提升																										
		预搅下沉																										
		喷浆提升																										
		重复下沉																										
		重复提升																										

班长 操作工 司泵工 记录员

B.2 深层搅拌桩供浆记录表见表 B.2。

表 B.2 深层搅拌桩供浆记录表

工程名称\_\_\_\_\_第\_\_\_\_\_页 共\_\_\_\_\_页

日期	桩号	输浆 管道 走浆 时间	水泥 标号	拌 灰 罐 数	每 罐 用 量	水泥 总用 量 t	外掺 剂总 用量 t	开 泵 时 间	停 泵 时 间	总喷 浆时 间	泵前 管内 状态	泵后 管内 状态	备注

司泵工\_\_\_\_\_

B.3 深层搅拌桩施工记录汇总表见表 B.3。

表 B.3 深层搅拌桩施工记录汇总表

工程名称\_\_\_\_\_第\_\_\_\_\_页 共\_\_\_\_\_页

日期	桩号	桩长 m	水泥 用量 t	水泥 标号	外掺剂 用量 kg	总 施工 时间	喷浆 时间	施工 记录页数	备注

资料员\_\_\_\_\_

B.4 深层搅拌水泥土防渗墙施工记录表见表 B.4。

表 B.4 深层搅拌水泥土防渗墙施工记录表

工程名称：                      施工班组：                      地面高程：

水泥标号				水灰比		孔深		备注
日期	单元	序号	来浆时间	停浆时间	喷浆总时 min	喷浆量		
						体积 L	质量 kg	
		I						
		II						
		III						
		I						
		II						
		III						
		I						
		II						
		III						

班长：                      记录：                      队长：

B.5 深层搅拌水泥土防渗墙制浆记录表见表 B.5。

表 B.5 深层搅拌水泥土防渗墙制浆记录表

工程名称：                      施工班组：                      地面高程：

水泥标号		水灰比		加水量		加灰量	
接班余浆量		交班余浆量		本班消耗水泥			
序号	开始	结束	浆量	序号	开始	结束	浆量

表 B.5 (续)

水泥标号		水灰比		加水量		加灰量	
接班余浆量			交班余浆量			本班消耗水泥	
序号	开始	结束	浆量	序号	开始	结束	浆量
合计用浆量:							

记录:



DL/T 5425—2009

B.6 深层搅拌水泥土防渗墙制浆记录表见表 B.6。

表 B.6 深层搅拌水泥土防渗墙制浆记录表

工程名称：                      施工班组：                      地面高程：                     

单元 墙号	序号	对位 偏差 mm	调平偏差			单元 墙号	序号	对位 偏差 mm	调平偏差		
			左	右	后				左	右	后
	I						I				
	II						II				
	III						III				
	I						I				
	II						II				
	III						III				
	I						I				
	II						II				
	III						III				
	I						I				
	II						II				
	III						III				
	I						I				
	II						II				
	III						III				

记录：

# 深层搅拌法技术规范

## 条文说明

目 录

1 范围..... 29

4 总则..... 30

5 设计..... 32

    5.1 一般规定 ..... 32

    5.2 复合地基设计 ..... 34

    5.3 防渗墙设计..... 40

    5.4 支护挡墙设计 ..... 43

6 施工..... 45

    6.1 一般规定 ..... 45

    6.2 施工设备 ..... 45

    6.3 施工准备 ..... 48

    6.4 工艺试验 ..... 50

    6.5 施工作业 ..... 51

7 施工质量控制..... 55

8 质量检验与验收 ..... 58

## 1 范 围

深层搅拌法最早在美国研制成功,称为 Mixed-in-place pile(简称 MIP 法)。国内由冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院于 1977 年开始进行室内试验和施工机械研制工作。1980 年在工程中正式应用深层搅拌法加固软土地基。国内深层搅拌法在近 20 多年发展迅速,已能批量生产各种类型的深层搅拌机械,形成了一套可用于复合地基处理、堤坝防渗及基坑支护等用途的施工方法。该施工方法已广泛应用于水电、水利、工业与民用建筑、铁路、公路、市政等各个领域。1998 年长江大洪水后,北京振冲江河截渗技术开发有限公司研制的多头小直径深层搅拌机械的出现,大大推动了深层搅拌法在水电水利工程中水库大坝、堤防等工程项目中防添加固的应用。2000 年长江大堤加固中一次使用水泥土防渗墙工程量就达 100 万  $\text{m}^2$ 。目前水泥土防渗墙的应用已在全国普及,取得了良好的经济效益。

水电水利工程深层搅拌法的应用环境与工业与民用建筑、公路、铁路等其他领域有所不同,为了更好地推广应用深层搅拌技术,总结了若干年来在水电水利工程中设计、施工、监理方面的经验,并参考了其他领域的经验,制定本标准。

## 4. 总 则

4.0.1 深层搅拌法地基处理技术有特定的适用范围。当建（构）筑物对地基要求与地质条件符合深层搅拌技术适用条件时，才能发挥其技术优势，获得良好的经济效益。深层搅拌技术处理地基的效果除与地基的地质条件有关外，还与搅拌的均匀性及固化剂的掺入量，以及搅拌机具和搅拌工艺密切相关。因此，采用深层搅拌技术应对建（构）筑物对地基的要求、地质条件、搅拌机具及工艺进行综合研究，对采用深层搅拌法处理地基的可行性与经济合理性作出评价。

4.0.3 目前国内已研制出单钻头、双钻头和多钻头深层搅拌施工机械。施工深度一般为 20m 以内。本标准适用于处理深度 25m 以内的防渗工程，处理深度超过 25m 时，应进行现场试验确认满足设计要求后方可使用。对于以提高复合地基承载力为主要目的的地基处理工程，施工深度应控制在 20m 以内，在有较高地基变形要求时，可通过论证提高施工深度，参考本标准执行。

4.0.4 深层搅拌法适用于加固黏性土、砂土和粉土等地基。它是利用水泥作为固化剂，通过特制的搅拌机械，就地将土体和固化剂强制搅拌，使土体硬结成具有整体性、水稳性和一定强度的水泥加固土，从而提高地基土强度，增大变形模量，提高土体防渗性能。

作为垂直承载桩时，深层搅拌桩处理欠固结的淤泥和淤泥质土时要通过试验论证，主要是为了避免加固后土体沉降对桩体产生负摩擦力。加固粗粒土时，应注意有无明显的流动地下水，以防固化剂尚未硬结而遭冲损。

一般认为用水泥作固化材料，对含有高岭石、多水高岭石、蒙脱石等黏土矿物的土体加固效果较好；对含有伊利石、氯化物

和水铝石英等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。

当黏性土的塑性指数  $I_p$  大于 25 时，容易在搅拌头叶片上形成泥团，无法完成水泥土的拌和。而对含砾小于 5cm 的砂砾层，其 2cm~5cm 的含量一般应不大于 15%，以免影响搅拌效果。

对于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，对水泥土具有结晶性侵蚀，从而导致水泥土出现分裂、崩解而丧失强度。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，以提高水泥土的抗侵蚀性能。

4.0.5 工艺性试验的目的是：提供满足设计固化剂掺入量的各种操作参数；验证搅拌均匀程度及成桩直径；了解下钻及提升的阻力情况，并采取相应的措施。试验区域的选定应充分考虑其工程地质条件的代表性，试验区数量和试验工程量可根据工程规模和工程地质条件的复杂程度按工程要求确定。

在试桩工作过程中，可钻取芯样分别进行 28d 和 90d 无侧限抗压强度试验，在检测桩体无侧限抗压强度能否满足设计要求的同时，若芯样样本满足统计学要求，借以建立 28d 无侧限抗压强度与 90d 无侧限抗压强度之间的换算关系，以缩短工程施工工期。若试桩样本不满足统计要求，可利用本标准条文说明 5.1.4 中提出的不同龄期的水泥土抗压强度间大致呈线性关系的规律，利用其经验关系式进行换算。

工艺试桩的同时，还应注意查明：

1 填土层的组成：特别是碎、块石的尺寸和含量，施工时必须清除大块石后再予施工。

2 有机质含量：有机质含量较高会阻碍水泥水化反应，影响水泥土的强度增长；对于有机质含量高的填土及吹填土应予慎重考虑。对生活垃圾的填土不应采用水泥土搅拌法加固。

## 5 设 计

### 5.1 一 般 规 定

5.1.1 深层搅拌桩由于对地基具有加固、支承、支挡、止水等多种功能，用途十分广泛，例如：加固软土地基，以形成复合地基而支撑建筑物、结构物基础；加固机场跑道站坪、铁路公路路基及厂房内外有地面堆载的场地地基；作为高层建筑、工业、市政设施等的深基坑和地下管道沟槽开挖的围护结构；当采用 SMW 法（即在搅拌桩中插入型钢）作为围护结构时，开挖深度可加大；稳定或加固基坑（或沟槽）底部，以防止土体隆起和增加支护结构的被动土压力；配合钢板或钻孔灌注桩等柱列式支护结构，作为止水帷幕；稳定边坡、河岸、桥台或高填方路堤，并作为止水帷幕或防渗墙等。

5.1.3 采用水泥作为固化剂材料，在其他条件相同时，在同一土层中水泥掺入比不同时，水泥土强度将不同。就 32.5 级水泥来说，一般水泥掺入比 $\alpha_w$ 采用 10%~15%。对于有特殊要求的地基，如需要较高的抗压、抗剪强度的地基工程，可提高水泥掺入比至 20%~25%；对于地基土层较软弱、含水量大、孔隙比高的土层，也可视工程设计要求使用较大的水泥掺入比。由于块状加固属于大体积处理，对于水泥土的强度要求不高，因此为了节约水泥，降低成本，一般可选用 7%~12% 的水泥掺量。水泥土的抗压强度随其相应的水泥掺入比的增加而增大，但因场地土质与施工条件的差异，掺入比的提高与水泥土强度增加的百分比是不完全一致的。水泥掺入比大于 10% 时，水泥土抗压强度可达 0.3MPa~2MPa 以上。

一般情况下，使用 32.5 级水泥，防渗墙工程水泥掺入比宜为 10%~15%；基坑支护和防冲蚀的挡墙工程水泥掺入比宜为

15%~18%。

国内工程上广泛采用 32.5 水泥作为固化剂，主要依工程技术条件与经济适用而确定。水泥标号直接影响水泥土的强度，水泥强度等级提高 10 级，水泥土强度  $f_{cu}$  增大 20%~30%。如要求达到相同强度，水泥强度等级提高 10 级可降低水泥掺入比 2%~3%。

本标准规定固化剂宜选用通用硅酸盐水泥，实际应用中，通常使用的水泥有普通硅酸盐水泥 (P.O)、矿渣硅酸盐水泥 (P.S.A)、复合硅酸盐水泥 (P.C)。当使用矿渣硅酸盐水泥时应注意，矿渣硅酸盐水泥早期强度明显低于普通硅酸盐水泥，但后期明显高于普通硅酸盐水泥。

外掺剂对水泥土强度有着不同的影响。木质素磺酸钙对水泥土强度的增长影响不大，主要起减水作用；三乙醇胺、氯化钙、碳酸钠、水玻璃和石膏等材料对水泥土强度有着增强作用，其效果对不同土质和不同水泥掺入比又有所不同。当掺入与水泥等量的粉煤灰后，水泥土强度可提高 10% 左右。故在加固软土时掺入粉煤灰不仅可消耗工业废料，水泥土强度还可有所提高。

5.1.4 水泥土的强度随龄期的增长而增大，一般情况下，砂性土早期强度高，黏性土早期强度低，28d 强度在室内标准养护下，仅能达到 90d 强度的 55%~70%，若在地下水位以下的黏性土层中水泥土强度会更低。因此，为了降低造价，对承重搅拌桩和防渗墙的水泥土试块，国内外都取 90d 龄期为标准龄期。90d 龄期强度是指水泥土试块在室内标准养护条件下所达到的强度。对起支挡作用承受水平荷载的搅拌桩，为了缩短养护期，水泥土强度标准取 28d 龄期为标准龄期。从抗压强度试验得知，在其他条件相同时，不同龄期的水泥土抗压强度间关系大致呈线性关系，其经验关系式如下：

$$f_{cu7} = (0.47 \sim 0.63) f_{cu28} \quad (1)$$

$$f_{cu14} = (0.62 \sim 0.80) f_{cu28} \quad (2)$$

$$f_{cu60} = (1.15 \sim 1.46) f_{cu28} \quad (3)$$



$$f_{cu90} = (1.43 \sim 1.80) f_{cu28} \quad (4)$$

$$f_{cu90} = (1.73 \sim 2.82) f_{cu14} \quad (5)$$

$$f_{cu90} = (2.37 \sim 3.73) f_{cu7} \quad (6)$$

式中:

$f_{cu7}$ 、 $f_{cu14}$ 、 $f_{cu28}$ 、 $f_{cu60}$ 、 $f_{cu90}$ ——分别为 7d、14d、28d、60d、90d 龄期的水泥土抗压强度。

当龄期超过三个月后,水泥土强度增长缓慢。180d 的水泥土强度为 90d 的 1.25 倍,而 180d 后的水泥土强度增长仍未终止。

## 5.2 复合地基设计

5.2.1 从承载力角度考虑,提高置换率比增加桩长的效果更好。水泥土桩是介于刚性桩与柔性桩之间具有一定压缩性的半刚性桩,桩身强度越高,其特性越接近刚性桩;反之则接近柔性桩。桩越长,则对桩身强度要求越高。但过高的桩身强度对复合地基承载力的提高及桩间土承载力的发挥是不利的。为了充分发挥桩间土的承载力和复合地基的潜力,应使土对桩的支承力与桩身强度所确定的单桩承载力接近。通常使后者略大于前者较为安全和经济。

对软土地区,地基处理的任务主要是解决地基的变形问题,即地基是在满足强度的基础上以变形进行控制的,因此水泥土搅拌桩的桩长应通过变形计算来确定。对于变形来说,增加桩长,对减少沉降是有利的。实践证明,若水泥土搅拌桩能穿透软弱土层到达强度相对较高的持力层,则沉降量有可能减少很多。

对某一地区的水泥土桩,其桩身强度是有一定限制的,也就是说,水泥土桩从承载力角度,存在一个有效桩长,单桩承载力在一定程度上并不随桩长的增加而增大。但当软弱土层较厚时,从减少地基的变形量方面考虑,应设计较长桩。原则上,桩长应穿透软弱土层到达强度较高的下卧土层,尽量在深厚软土层中避免采用“悬浮”桩型。

5.2.2 式(5.2.2-1)中桩周土的侧阻力特征值 $q_{si}$ 是根据现场载荷试验结果和已有工程经验总结确定的。规范中给出了深层搅拌法复合地基加固中常遇到的几种土层 $q_s$ 的取值。

式(5.2.2-1)中桩端地基承载力折减系数 $\alpha$ 取值与施工时桩端施工质量及桩端土质等条件有关。如果桩底部施工质量不好,水泥土桩没能真正支承在硬土层上,桩端地基承载力不能充分发挥,这时取 $\alpha=0.4$ 。反之,当桩端为较硬土层,桩底施工质量可靠时取 $\alpha=0.6$ ,通常取 $\alpha=0.5$ 。

式(5.2.2-1)中桩端地基承载力 $q_p$ ,一般可采用勘察报告提供的地基承载力,取值偏安全。

加固土试块尺寸通常选边长为70.7mm或50mm的立方体,但在黏性土等不易搅拌均匀的土层中,宜选用边长为70.7mm的立方体试块。

式(5.2.2-2)中的加固土强度折减系数 $\eta$ 是一个和工程经验以及拟建工程的性质密切相关的参数。工程经验包括对施工队伍素质、施工质量、室内强度试验与实际加固强度比值以及对实际工程加固效果等情况的掌握。拟建工程性质包括拟建工程的工程地质条件,上部结构对地基的要求以及工程的重要性等。目前在设计中一般取 $\eta=0.25\sim 0.33$ 。如果施工队伍素质较好,施工质量很高,现场实际施工的搅拌桩加固强度与室内试验结果接近,以往实际工程加固效果优良,且工程地质条件简单,工程对地基沉降要求又不高时,也可以取 $\eta$ 值大于0.33。

深层搅拌法常用于加固深厚层软土地基,根据室内模型试验和搅拌桩工作原理分析,桩端未抵达硬土层的搅拌桩,其桩身轴向应力自上而下逐渐减小,最大轴力位于桩顶2~3倍桩直径范围内。因此在搅拌单桩设计中,为节省固化剂材料和提高施工效率,桩身强度 $f_{cu}$ 应为变数,设计时可要求施工采用变掺量的施工工艺。目前,在设计时常使桩顶4m~5m强度满足式(5.2.2-2);4m~5m以下桩身强度则渐减,特别是长度超过10m的桩,其下部更

无必要满足式(5.2.2-2)。现有工程实践证明,这种变强度、变掺量设计方法的技术经济效果良好。

5.2.3 式(5.2.3)是计算搅拌桩复合地基承载力的基本公式,式中桩间土承载力折减系数 $\beta$ 是反映桩土共同作用的一个参数, $\beta=1$ 即表示桩与土共同承受荷载。

如果 $\beta=0$ ,即表示桩间土不承受荷载。

目前 $\beta$ 系数的取值一般以桩端土的软硬而定:

当桩端土为软土时, $\beta$ 取0.5~1;

当桩端土为硬土时, $\beta$ 取值小于0.5;

当不考虑桩间软土作用时, $\beta=0$ 。

桩身强度、在基础和桩之间是否设置褥垫层对 $\beta$ 系数也有影响。例如桩端是硬土,但桩身强度较低,桩压缩变形很大,这时桩间土就承受较大荷重, $\beta$ 可能大于0.5。在基础和桩之间设置褥垫层时, $\beta$ 可取高值。

实际加固设计时, $\beta$ 系数还应根据建筑物对沉降的要求而定。当建筑物对沉降要求较高时,即使桩端是软土, $\beta$ 也应取小值;这样较为安全。反之,当建筑物对沉降要求较低,容许有较大沉降时,即使桩端为硬土, $\beta$ 也可取大值,这样较为经济。

软土地基加固经常遇到塘沟等低洼地形,进行场地整平时必须大面积填土,这种新填土的自重固结沉降对刚性桩来说必将产生不可忽视的负摩擦力,但对搅拌桩来说,不仅格栅状的布桩型式犹如一个不封底的箱形基础,能减少负摩擦力的产生,且由于搅拌桩变形模量比刚性桩低得多,受荷后桩本身有一定压缩量,桩与桩间土能同时下沉,所以回填土的固结不会在搅拌桩侧壁产生较大的负摩擦力。现有工程设计中,一般都不考虑被加固地基表层新填土固结所产生的负摩擦力,但同时也不考虑土层所提供的侧壁摩擦力,据统计,这样处理的设计结果与建筑物实际沉降情况比较接近。

5.2.4. 复合地基加固设计时,已知上部结构要求的地基承载力,

根据式(5.2.2-1)和式(5.2.2-2)可初步计算得到单桩承载力 $R_u$ ,  $f_{sk}$ 可取天然地基承载力, 根据拟投入设备型号选取深层搅拌桩径。因此可初步计算理论上需要的最小的搅拌桩面积置换率 $m$ 。实际的搅拌桩面积置换率 $m$ 尚需根据上部结构型式和本标准要求具体布桩后确定, 但必须满足理论上计算出的最小搅拌桩面积置换率 $m$ 。

5.2.5 水泥土桩的布置型式对加固效果有很大影响, 一般根据工程地质特点和上部结构要求可采用柱状、壁状、格栅状、块状以及长短桩相结合等不同加固型式。

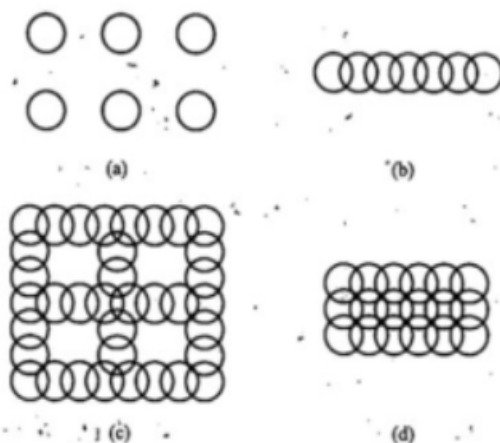
1 柱状: 每隔一定距离打设一根水泥土桩, 形成柱状加固型式, 适用于单层工业厂房独立基础和多层房屋条形基础下的地基加固, 它可充分发挥桩身强度与桩周侧阻力。

2 壁状: 将相邻桩体部分重叠搭接成为壁状加固型式, 适用于防渗墙、深基坑开挖时的边坡加固, 建筑物长高比大、刚度小和对不均匀沉降比较敏感的多层房屋条形基础下的地基加固。

3 格栅状或块状: 它是纵横两个方向的相邻桩体搭接而形成的加固型式。适用于上部结构单位面积荷载大和对不均匀沉降要求控制严格的建(构)筑物的地基加固。

4 长短桩相结合: 当地质条件复杂, 同一建筑物坐落在两类不同性质的地基土上时, 可用3m~5m的短桩将相邻长桩连成壁状或格栅状, 借以调整和减小不均匀沉降量。

水泥土桩的强度和刚度是介于柔性桩(砂桩、碎石桩等)和刚性桩(钢管桩、混凝土桩等)间的一种半刚性桩, 它所形成的桩体在无侧限情况下可保持直立, 在轴向力作用下又有一定的压缩性, 但其承载性能又与刚性桩相似, 因此在设计时可仅在上部结构基础范围内布桩, 不必像柔性桩一样需在基础外设置护桩。



(a) 柱状; (b) 壁状; (c) 格栅状; (d) 块状

图1 水泥土桩的布置型式

5.2.6 深层搅拌桩加固设计中往往以群桩形式出现,群桩中各桩与单桩的工作状态迥然不同。以现场两组单桩并列而成的双桩载荷试验来看,双桩承载力均小于两根单桩承载力之和;双桩沉降量均大于单桩沉降量。可见当桩间距离较小时,由于应力重叠,产生“群桩效应”。因此在设计中,当搅拌桩的置换率较大( $m>20\%$ )且非单行排列,桩端下仍然存在较软弱的土层时,尚应将搅拌桩与桩间土视为一个假想的块状或格栅状,验算下卧层地基强度。

计算中假定土对假想复合土体的摩擦阻力作用在群桩体的垂直面上,强度验算需满足:

$$P_b = \frac{f_{spk}A + G - A_s q_s - f_{sk}(A - A_1)}{A_1} < f_z \quad (7)$$

$f_z$  可参考 GB 50007—2002 中 5.2.4 计算地基承载力特征值。

5.2.7 水泥土桩复合地基的变形包括群桩体的压缩变形和桩端下未处理土层的压缩变形之和。

式 (5.2.7-1) 和式 (5.2.7-2) 是半理论半经验的搅拌桩水泥土体的压缩量计算公式。其中搅拌桩的压缩模量  $E_p$  的数值,根

据经验黏性土可取 $(100\sim 120)f_{cu}$  (kPa), 砂性土可取 $(200\sim 1000)f_{cu}$  (kPa)。对桩较短或桩身强度较低者可取低值, 反之可取高值。

根据大量水泥土单桩复合地基载荷试验资料, 得到了在工作荷载下水泥土桩复合地基的复合模量, 一般为 $15\text{MPa}\sim 25\text{MPa}$ , 其大小受面积置换率、桩间土质和桩身质量等因素的影响。且根据理论分析和实测结果, 复合地基的复合模量总是大于由桩的模量和桩间土的模量的面积加权之和。大量的水泥土桩设计计算及实测结果表明, 群桩体的压缩变形量仅变化在 $10\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 间。

下卧层变形按天然地基采用分层总和法进行计算。

5.2.8 在刚性基础和桩之间设置一定厚度的褥垫层后, 可以保证基础通过褥垫层把一部分荷载传到桩间土上, 调整桩和土荷载的分担作用。特别是当桩身强度较大时, 在基础下设置褥垫层可以减小桩土应力比, 充分发挥桩间土的作用, 即可增大 $\beta$ 值, 减少基础底面的应力集中。当采用水泥土垫层时, 水泥掺量应不少于20%。

5.2.9 在复合地基的设计中, 设计者往往将水泥土桩理解为桩基, 因此要求其像刚性桩那样, 在桩长范围内强度一致, 而且桩强度越高越好。这是违反复合地基基本假定的。根据室内模型试验和水泥土的加固机理分析, 其桩身轴向应力自上而下逐渐减小, 其最大轴力位于桩顶3倍桩径范围内。因此, 在水泥土单桩设计中, 为节省固化剂材料和提高施工效率, 设计时可采用变掺量的施工工艺。现有工程实践证明, 这种变强度的设计方法能获得良好的技术经济效果。

桩身强度亦不宜太高。应使桩身有一定的变形量, 这样才能促使复合地基中桩间土强度的发挥。

固化剂与土的搅拌均匀程度对加固体的强度有较大的影响。实践证明采取较合适的水灰比(根据土层含水量确定), 适当进行复搅工艺, 对提高桩体强度有较好效果。

### 5.3 防渗墙设计

5.3.2 本条规定是大多数情况下水泥土防渗墙位置的布置要求。单从防渗工程的理论出发,如果受现场条件所限,防渗墙布置在堤(坝)轴线上游侧的任何位置,包括上游坡面,都是可以的。当然这还需要其他的防渗措施与防渗墙共同组成一个完整的防渗体系。

5.3.3 水泥土防渗墙厚度与作用水头、渗透系数、允许比降、地层性状等多种因素有关,而且这些因素间还互相影响,是一个复杂的多元关系。在过去的防渗墙设计中,通常是根据已有成功经验初选一个或两个墙厚进行渗流计算(有的还需进行应力应变计算),直至满足要求为止。本条给出的计算式,简化了以上影响因素,以期通过该式给出墙厚的一个初值。同样,该初值是否满足防渗要求仍需通过渗流计算来确定。式中, $\Delta H$ 为墙体两侧的水头差,这是理论上的要求,但实际上在未进行渗流计算前是未知的,因此计算时可用全水头替代; $[J]$ 为水泥土的允许比降,防渗墙运行时,由于两侧土体的支撑反滤作用,实际所能承受的比降较之试验所得到的出口无保护水泥土的破坏比降要大; $\Delta H$ 和 $[J]$ 的上述考虑为有效厚度 $S$ 的计算结果提供了一定的安全裕度。

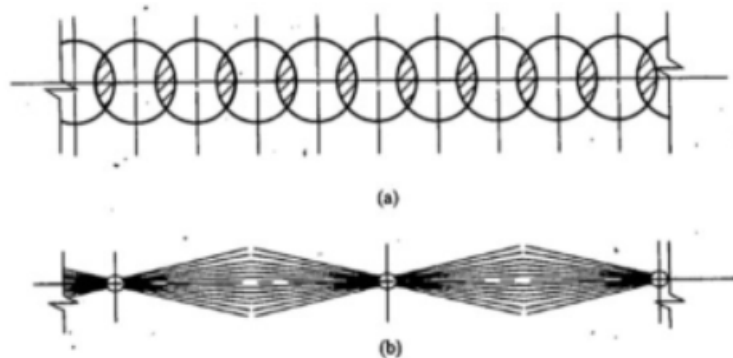
施工垂直度控制偏差 $\eta_i$ 的取值主要取决于施工深度、施工设备状况和施工队伍操作水平。施工深度小,施工设备为专用设备,有较完善的垂直度控制措施;操作人员熟练取低值,反之取高值。

5.3.4 截断全部透水层直达不透水层的防渗体称为全封闭防渗墙;在多层透水地层中,截断上部透水层并达中部相对不透水层的防渗体称为半封闭防渗墙;防渗墙未能截断透水层称为悬挂式。在堤防工程中,由于地层层面均呈水平向,因此,所谓全封闭、半封闭仅对垂直向而言,水平方向难以封闭。研究表明,在堤防工程中,悬挂式防渗墙可防止堤基浅层渗透变形的产生。

目前多头深层搅拌设备最大施工深度为25m,在相对不透水

土层埋深较深时，应用多头深层搅拌截渗墙已难以施工，可采用上部用深层搅拌法下部用高压喷浆法相结合来施工。该施工方法已由北京振冲江河截渗技术开发有限公司试验研究，并成功应用于广西梧州城市防洪墙工程和山东东平湖大堤加固防渗工程等多项工程，并通过水利部组织的专家鉴定，成墙工艺过程为：

利用水泥土的固化机理，针对不同深度土层分别采用深层搅拌和高压喷浆工法。在施工深度小于 25m 的土层中，先使用多头深层搅拌桩机钻进、喷浆（较低供浆压力）、搅拌，而后提升、喷浆、搅拌至地面；然后在施工深度大于 25m 的土层中或施工深度小于 25m 的砂砾石层中，使用钻机按照设计孔距及深度钻孔，钻进、接管钻进至预定深度，再用高压喷浆设备，按照设计喷浆角度和提升速度，喷浆（较高供浆压力）切削搅拌土层，同时提升至地面。上述过程所形成的地下连续墙由深层搅拌防渗墙和高压喷浆防渗墙结合组成。成墙横截面示意图如图 2 所示。



(a) 0~25m 深为深层搅拌防渗墙；(b) 大于 25m 深为高压喷浆防渗墙

图 2 0~25m 和大于 25m 成墙平面示意图

连续墙在垂直方向，深层搅拌防渗墙和高压喷浆防渗墙结合处搭接长度不小于 0.5m，施工时采取摆喷和旋喷结合的办法确保搭接。其平面示意图如图 3 所示。



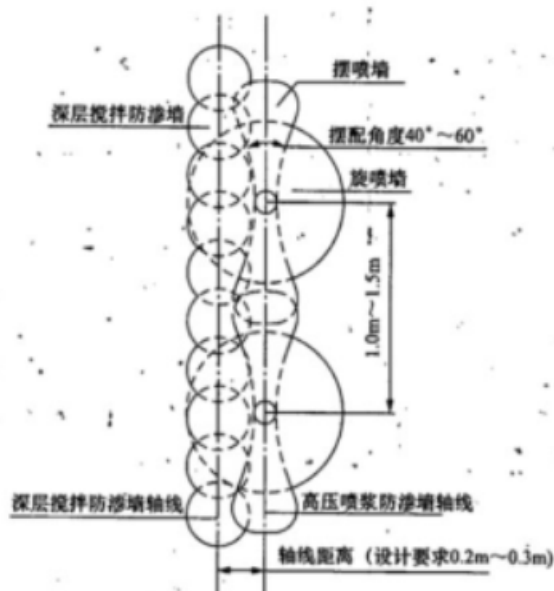


图3 搭接处成墙平面搭接图

5.3.6 作为防渗墙，其功能主要是防渗，因此其渗透性指标是主要的且是第一位的。防渗效果同时还取决于防渗墙与透水层两种材料的相对渗透性（二者渗透系数之比），相对渗透性愈小，防渗效果愈好。水泥土的渗透稳定性问题，目前还是参照无黏性土用允许比降来衡量。但水泥土与无黏性土有着本质的区别，如何引用原来允许比降的概念还有许多问题需要研究。参照无黏性土的试验方法，水泥土的破坏比降会有很高的数值，加之墙体两侧土体的支撑与反滤作用，多数专家认为，对水泥土防渗墙，允许比降甚至已没有直接的工程意义。但另有部分专家从溶蚀、淋滤的角度考虑，认为比降这一参数指标还应予以保留，可作为次要指标。强度指标在大坝工程中应予以重视，但在堤防工程中，因墙深不大且有土体的围压作用，防渗墙通常不会因强度问题而破坏。

5.3.7 当水头差较大时,水泥土防渗墙的厚度、深度及水泥土的材料参数经上述诸条初步选定后,是否能控制堤(坝)身及地基的渗流状态,保证渗流安全,还应通过渗流计算予以复核。因地层条件一般都较复杂,加之水泥土防渗墙的作用,渗流边界就更加复杂,渗流计算以采用有限元法为宜。选取的典型断面可考虑最大断面、已有险情的断面、地质评价差的断面等。评价的主要项目有浸润线、出口比降、抗浮稳定以及渗流量等。若经复核不满足要求,地基土层的出口比降大于地层土的允许比降,即应调整墙深、水泥土参数等指标。

#### 5.4 支护挡墙设计

5.4.1 近几年深层搅拌法在我国被广泛用于5m~7m深基坑围护结构,这种围护结构多采用格栅形式,其作用像一个重力坝式挡墙。实践证明,若仅用该工法加固大于7m的深基坑则会不经济,若用该工法形成防渗墙,同时结合钢筋混凝土灌注桩挡土或土钉墙则可扩大其应用深度。中石油北京研发中心基坑支护采用了多头小直径深层搅拌桩防渗墙和土钉墙结合的施工工艺,基坑开挖最大深度达11.5m。

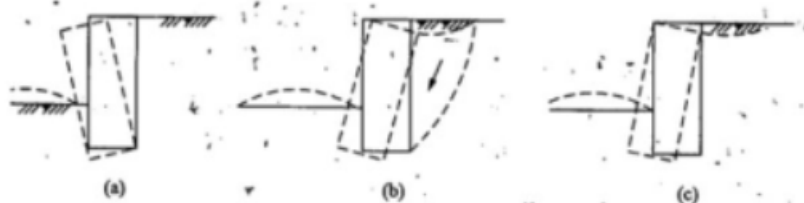
5.4.4 水泥土挡墙的破坏模式有倾覆破坏、地基整体破坏和墙趾外移破坏。

1 倾覆破坏:如图4(a)所示,由于墙身入土太浅或宽度不足,当地面堆载过多或重载车辆在坑边频繁行驶,都可能导致倾覆破坏。

2 地基整体破坏:如图4(b)所示,当开挖深度较大,基底土又十分软弱时,特别当地面存在大量堆载(堆土)时,地基土连同支挡结构一起滑动。地基整体破坏造成的危害极大,往往伴随着地面大量下陷及坑底隆起,也可能推动坑内主体结构工程一起位移。

3 墙趾外移破坏:如图4(c)所示,当挡土结构插入深度

不够，坑底土太软或因管涌及流砂所削弱；可能发生墙趾外移所引起的破坏。



(a) 倾覆破坏；(b) 地基整体破坏；(c) 墙趾外移破坏

图4 混凝土挡墙的破坏型式

抗倾覆安全系数  $K_q$  取值一般为 1.5。当对位移要求严格时，可适当提高；当边长小于 20m 时，应适当减小。抗滑动稳定安全系数  $K_b$  取值一般为 1.3。当对位移要求较严格时，可适当提高；当基坑边长小于 20m 时，可适当减小。稳定安全系数  $K$  的取值应考虑附近各类建筑物的允许位移量、施工质量、可靠性和开挖期长短等因素，可以参考同类工程实例。当无经验时，可取  $K \geq 1.25$ 。

## 6 施 工

### 6.1 一 般 规 定

6.1.2 施工组织设计除了工期、施工设备的配置、主要材料与数量、施工顺序、施工人员组织、施工场地布置、施工质量控制及安全施工措施等基本内容外,还应包括施工操作规定。该规定应根据设备性能、施工地质条件和施工要求制定,其主要内容包括:设备操作步骤、要点、主要施工参数的控制方法、深层搅拌机的下沉与提升速度,以及一些异常现象的处理方法。

6.1.3 一般情况,复合地基处理和基坑支护地质勘探孔较密,不需进行先导孔,但堤坝防渗工程中,由于防渗墙沿线较长,地质勘探孔间距多在 100m 以上,因此为进一步探明防渗墙合理的下限深度位置,还要进行补充先导孔。先导孔间距一般为 50m,特殊地质可适当加密,布孔应考虑原地质勘探孔布孔情况,保证 50m 以内有一个地质孔,孔应深入设计防渗墙底层以下 5m,应钻取芯样进行鉴定,由地质工程师描述地层情况,绘出地质剖面图,初步推荐防渗墙下限深度位置,报设计批准。

### 6.2 施 工 设 备

6.2.1 深层搅拌机有叶片式、螺旋叶片式或同时具有叶片和螺旋叶片的搅拌形式。在黏性土中宜选用以叶片式为主的搅拌形式;在砂性土中宜选用螺旋叶片式为主的搅拌形式;在砂砾土中宜选用螺旋叶片搅拌形式。

多头深层搅拌施工常用设备有 BJS、ZCJ 两种系列设备,有一机三钻头和一机五钻头,其轴距为 320mm。若采取一次成墙,则最小钻头直径需要 340mm;若施工深度不深(如小于 15m),

可采取两次成墙，则最小钻头直径 260mm 即可。

多头深层搅拌成墙搭接方式：

施工多采用一次成墙搭接方式，但在施工深度较浅时，为了降低造价也可采用二次成墙搭接方式。以一机三个钻头为例，搭接方式如下：

1 一次成墙搭接方式如图 5 所示。

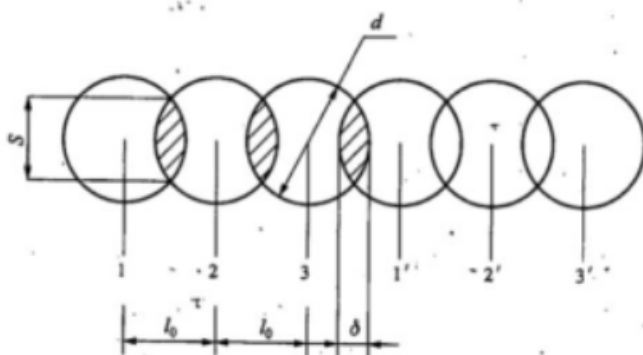


图 5 一次成墙搭接方式图

搭接方式是先施工 1、2、3 即为一个单元墙，然后再施工 1'、2'、3' 即下一个单元墙。 $l_0$  为桩间距， $d$  为钻头直径，可根据需要选取，则最小墙厚  $S$  为：

$$S = \sqrt{d^2 - l_0^2} \quad (8)$$

$\delta$  为单元墙桩间搭接长度，在施工深度小于 15m 时， $\delta$  不应小于 100mm；在施工深度 15m~20m 时， $\delta$  不应小于 150mm；在施工深度大于 20m 时， $\delta$  不应小于 200mm。

2 二次成墙搭接方式如图 6 所示。

搭接方式是先施工 1、2、3 三根桩为第一序，再施工 1'、2'、3' 三根桩为第二序。1、1'、2、2'、3、3' 六根桩组成一个单元墙。 $l_0$  为两次施工的桩间距， $d$  为钻头直径，最小墙厚  $S$  计算公式同一次成墙。 $\delta$  为单元墙桩间搭接长度，在施工深度小于 10m

时,  $\delta$  不应小于 100mm。

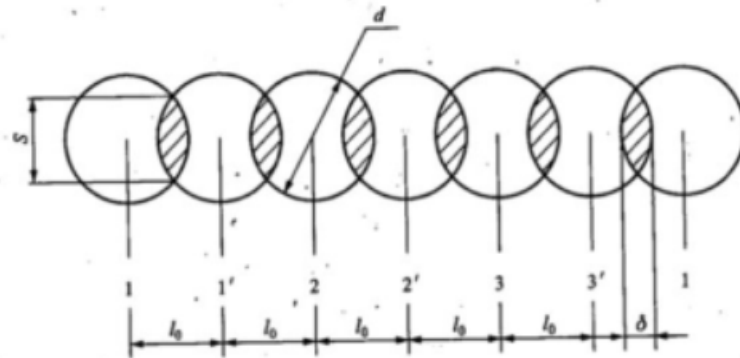


图 6 二次成墙搭接方式图

6.2.2 深层搅拌机施工时, 搅拌次数越多, 则拌和越为均匀, 水泥石平均强度也越高, 但施工效率就降低。在复合地基处理时应适当增加搅拌次数。试验证明, 当加固范围内土体任一点的水泥石经过 20 次的拌和, 其平均强度即可达到较高值。每遍搅拌次数  $N$  由下式计算:

$$N = \frac{h \cos \beta \Sigma Z}{v} n \quad (9)$$

式中:

$h$  —— 搅拌叶片的宽度, m;

$\beta$  —— 搅拌叶片与搅拌轴的垂直夹角, ( $^{\circ}$ );

$\Sigma Z$  —— 搅拌叶片的总枚数;

$n$  —— 搅拌头的回转数, r/min;

$v$  —— 搅拌头的提升速度, m/min。

6.2.3 本条要求深层搅拌桩机所具备的功能是保证水泥石搅拌桩成墙质量的基本条件。

6.2.4 注浆泵应保证其实际流量与搅拌机的喷浆钻进下沉或喷浆提升速度相匹配, 使水泥掺量在水泥石桩中均匀分配; 对于贯

入送浆工艺，其注浆工作压力比提升送浆工艺要高，配备具有较高工作压力的注浆泵，其故障发生相对较少，施工效率也高。

### 6.3 施 工 准 备

6.3.1 根据实际施工经验，搅拌法在施工到顶端 0.3m~0.5m 范围时，因上覆土压力较小，搅拌质量较差。因此，其场地整平标高应比设计确定的桩顶标高再高出 0.3m~0.5m，桩制作时仍施工到地面。待开挖基坑时，再将上部 0.3m~0.5m 的桩身质量较差的桩段挖去。根据现场实践表明，当搅拌桩作为承重桩进行基坑开挖时，桩身水泥土已有一定的强度，若用机械开挖基坑，往往容易碰撞损坏桩顶，因此基底标高以上 0.3m 宜采用人工开挖，以保护桩头质量。当水泥土防渗墙顶无特殊要求时可不凿除。

国产水泥土搅拌机的搅拌头大都采用双层（或多层）十字杆形或叶片螺旋形。这类搅拌头切削和搅拌加固软土十分合适，但对块径大于 100mm 的石块、树根和生活垃圾等大块物的切割能力较差，即使将搅拌头进行加强处理能穿过块石层，但施工效率较低，机械磨损严重。因此，施工时应将杂填土层中大直径块石和其他障碍物挖除后再填素土，虽增加一点工程量，但施工效率可大大提高。

水泥土防渗墙施工机械施工工作面常位于堤坝顶，堤坝宽度往往较小，而且常常又是交通道路，因此在施工时应充分考虑施工机械的工作面宽度。

6.3.2 施工前应测量实际工作面高程，实际工作面高程与图上地面高程以及有效桩顶高程可能不一致，因此应认真核对各高程，确保有效桩长。

6.3.3 每一个搅拌施工现场，由于施工设备的差异，注浆泵输浆量和起吊提升速度也有差异，而水泥浆从注浆泵泵出经输浆管到达喷浆口的时间则随输浆管长度而变化，因此这些参数均应在施工前作实际标定。

## 6.3.4 固化剂和外掺剂。

## 1 水泥掺入量。

根据水泥掺入比确定水泥掺入量 ( $\bar{w}$ )。当水泥掺入比 ( $\alpha_w$ ) 确定后, 水泥掺入量可按下式计算:

$$\bar{w} = \alpha_w \gamma \quad (10)$$

式中:

$\alpha_w$  ——水泥掺入比;

$\gamma$  ——被加固土天然湿密度,  $t/m^3$ ;

$\bar{w}$  ——平均加固 (搅拌)  $1m^3$  土所需要的水泥掺入量,  $t$ 。

水泥掺入量决定了水泥土的抗压强度、压缩模量、渗透破坏比降, 对渗透系数也有较大影响。土层中可掺入的水泥量取决于天然土层性质 (空隙率、土层类别、含水量等) 和施工机械的性能。在施工前可取被加固土做室内水泥土配比试验, 获得设计要求的抗压强度 (渗透系数、破坏比降) 等指标相对应的水泥掺入量。一般来说, 试验龄期应为 90d, 但在设计施工前由于时间的限制可做 7d 或 28d 试验, 由 7d、28d 龄期推算到 90d 龄期。根据室内试验初步确定合适的水泥掺入量, 室内试验必须考虑施工现场条件同室内搅拌配制水泥试样时条件的差别。一般情况下, 现场桩体强度比室内制作的试块强度低 25%~35%。

在实际施工时, 水泥土强度具有较大的离散性, 水泥土强度的高低主要指平均强度, 水泥掺入量高水泥土的平均强度并不一定高, 提高强度除加大水泥掺入量外, 还应考虑提高水泥土的均匀性, 降低离散性。

## 2 水泥浆水灰比的选择。

JGJ 79—2002 中规定可选用 0.45~0.55, 在实际施工中, 设计和监理人员往往按此要求采用了较小的水灰比, 结果发现在地基土含水量较小时, 水泥土夹泥现象严重, 水泥土强度离散性很大, 经过复搅也收效不大。事实上, 水泥浆水灰比的选择取决于



被加固土的含水量、土质性质、机械搅拌能力及输浆情况。试验表明,现场施工的水泥土性能取决于水泥的可掺入性及可搅拌性。掺入的水泥量大,但未搅拌均匀,水泥土力学指标并不理想,水灰比的大小对水泥土的均匀性起着至关重要的作用。

实践证明:同样的施工机械,在同一土层中使用不同水灰比,水泥土被搅拌的均匀性差别较大。相对来说,水灰比越大,水泥土被搅拌得越均匀。在堤防加固中,因堤防土体含水量低,尤其我国北方的堤防多年未受水浸润,常需要较大水灰比,有工程实例表明,水灰比可高达 2.5。但在地基处理中,由于多为软地基土,含水量较高,原土层往往已处于饱和状态。这种情况在我国南方沿海地区较常见。若取较大水灰比,则对提高地基强度不利,因此水灰比宜取较低值,甚至可低到 0.5。水灰比应以现场施工试验来定,水灰比取值范围一般为 0.5~2.5 (水:灰)。一般来说,黏性土当含水量小于 30% 时,水灰比应不小于 1.5,当含水量大于 50% 时,水灰比应不大于 0.8;砂性土中视含水量而定,应满足能充分搅拌且不漏浆。

### 3 外掺剂。

在实际工程中,较少采用外掺剂,若有特殊要求时,可选用相应的外掺剂。石膏和木质素磺酸钙(简称木钙)是两种最常用的水泥搅拌桩外掺剂。石膏与水泥水化物反应生成的钙矾石结晶能大量吸附软黏土中的自由水分,因此有增大强度的作用,是一种良好的早强剂。此外,在水泥硬化过程中具有一定的缓凝作用,有利于搅拌施工。石膏掺合量约为水泥用量的 2%。

木钙主要起减水作用,以增加水泥浆的稠度,便于泵送,但对水泥土强度影响不大。木钙的掺合量为水泥用量的 0.2%。

## 6.4 工 艺 试 验

6.4.1 每一个水泥土搅拌桩的施工现场,由于土质有差异,搅拌加固质量有较大的差别。所以在正式搅拌桩施工前,均应按施工

组织设计确定的搅拌施工工艺制作数根试桩，再最后确定水泥浆的水灰比、泵送时间、搅拌机提升速度和复搅深度等参数。

制桩质量的优劣直接关系到地基处理的效果，其中的关键是注浆量、水泥浆与软土搅拌的均匀程度。因此，施工中应严格控制喷浆提升速度  $v$ ，可按下式计算：

$$v = \frac{\gamma_d Q}{F \gamma \alpha_w (1 + \alpha_c)} \quad (11)$$

式中：

$v$ ——搅拌头喷浆提升速度，m/min；

$\gamma_d$ 、 $\gamma$ ——分别为水泥浆和土的重度，kN/m<sup>3</sup>；

$Q$ ——灰浆泵的排量，m<sup>3</sup>/min；

$F$ ——搅拌桩的截面积，m<sup>2</sup>；

$\alpha_w$ ——水泥掺入比；

$\alpha_c$ ——水泥浆水灰比。

## 6.5 施 工 作 业

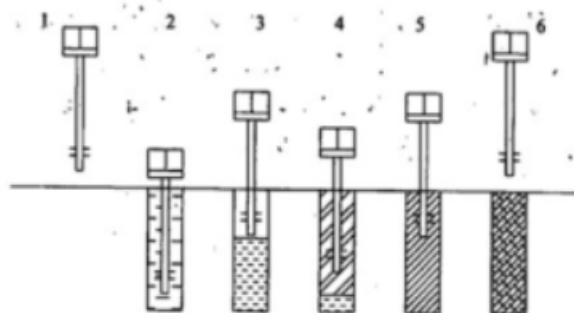
### 6.5.1 复合地基处理和基坑支护施工工序。

深层搅拌桩施工流程：桩机就位→钻进到孔底→提升喷浆搅拌→重复钻进搅拌→重复提升喷浆复搅→成桩完毕，如图7所示。在施工中，有时在钻进贯入时喷浆，也有在提升时喷浆，何时喷浆最佳须根据地层的软硬情况和搅拌头的工艺特点而定。同理，重复搅拌过程中是否喷浆，亦应根据地基土的力学指标和设计要求灵活掌握。

1 桩机就位调平。利用起重机或开动绞车移动深层搅拌桩机到达指定桩位。为保证桩位准确，必须使用定位卡，桩位对中误差不大于2cm，导向架和搅拌轴应与地面垂直，垂直度的偏离不应超过0.5%。

2 钻进下沉。若需喷浆，则开动灰浆泵，核实浆液从喷嘴喷出后，启动桩机向下旋转钻进适量喷浆，钻进速度、旋转速度、

喷浆压力、喷浆量应根据工艺试桩成桩时确定的参数操作。



1—桩机就位；2—钻进到孔底；3—提升喷浆搅拌；4—重复钻进搅拌；  
5—重复提升喷浆复搅；6—成桩完毕

图7 浆喷搅拌桩施工流程图

3 提升喷浆搅拌。搅拌头自桩底反转匀速搅拌提升同时喷浆，直到地面。停浆应至工艺试验时停浆面，搅拌头如被软黏土包裹应及时清除。

4 重复钻进搅拌。按上述工序2操作要求进行，如喷浆量已达到设计要求时，需要重复搅拌不再送浆。

5 重复提升搅拌。按照上述工序3操作步骤进行，将搅拌头提升到地面。

6 停机移位。工序3、4、5共进行3次复搅，即可完成一根搅拌桩的作业。开动灰浆泵清洗管路中残存的水泥浆，桩机移至另一桩位，施工另一根搅拌桩。

#### 6.5.2 水泥土防渗墙施工。

水泥土防渗墙工序基本同6.5.1条文说明，考虑到防渗墙施工的特殊性，补充说明如下：

##### 1 主机就位调平：

- 1) 对位是影响桩与桩之间的搭接尺寸的因素之一。尤其要注意的是，主机调平后在施工中也可能因振动造成整机滑移，带来桩位偏差。为了减少累计误差，应每

施工十个单元校核一次，并记录实际偏差，以便及时调整。

- 2) 施工前应核定主机上的水平测控装置，确保主机机架处于铅垂状态。
- 3) 通过四个支腿油缸工作调平。重点应注意检查调平后施工过程中，是否有支腿下陷（工作场地土质松软造成）或者油缸泄压等现象，若有应及时通过支腿油缸调平。

## 2 下沉输浆：

- 1) 为保证不偏孔，开始入土钻进时不宜用高速钻进，一般钻进速度不应大于 0.8m/min。
- 2) 土层较硬时，不应用高速钻进，速度不大于 0.6 m/min。
- 3) 应尽量保证输浆均匀，根据地层吃浆变化可调整输浆量。
- 4) 输浆量应有专门的装置计量，如流量计等。
- 5) 输浆应有一定的压力，一般输浆压力为 0.5 MPa~1.0MPa。

3 提升、搅拌和输浆：提升速度和搅拌速度应匹配，应确保达到设计的搅拌点数；提升速度和输浆量应密切配合。一般来说，提升速度快，输浆量也应大，二者对应关系在现场根据设计水泥掺入量要求来定。

4 目前用于防渗墙施工的设备多为特制专用设备，搅拌钻头叶片层数大于 3 层，搅拌转速也较大，因此根据工艺试验结果，若能满足设计要求，可不进行 6.5.1 条工序 4 和工序 5 的工作。

6.5.3 为了保证搅拌桩的垂直度，施工场地应平整，设备应配置垂直度检测仪器。施工过程中随时检查垂直度控制情况。本条中桩位偏差是指成桩后偏差，因此施工时桩位放线偏差应控制在 20mm 以内。为保证桩直径不小于设计值，施工过程中应定期检

查钻头磨损量，磨损量不得大于 10mm。

6.5.4 深层搅拌机预搅下沉时，当遇到较坚硬的表土层而使下沉速度过慢时，可适当加水下沉。虽然试验表明，在水泥掺量相同的情况下，当土层的含水量增加 10%，水泥土的强度会降低 10%~15%。但考虑到搅拌桩设计中一般是按下部最软的土层来确定水泥掺量的，因此只要表层硬土经加水搅拌后的强度不低于下部软土加固后的强度，是能够满足设计要求的。

6.5.6 当深层搅拌的施工工艺确定后，水泥浆的定量不间断供应是确保搅拌桩施工质量的重要条件。中间停止输浆 3h 以上将会使水泥浆在整个输浆管路中凝固，因此必须排清全部水泥浆，清洗管路。

6.5.7 施工过程中因故停工时，若施工能下沉达到原施工面 0.5m 以下，可按本条方法 1 处理。通常情况下，在砂性土中水泥土 8h 即可凝固到一定强度，因此，在砂性土中停工超过 8h 再恢复施工时，难以下沉达到原施工面 0.5m 以下，则应按本条方法 2 处理。在黏性土中，水泥土 24h 凝固有一定强度，因此，停工超过 24h 再恢复施工时，难以下沉达到原施工面 0.5m 以下，可按本条方法 2 处理。

## 7 施工质量控制

7.0.1 质量管理体系的建立是质量全过程控制的重要保证。所有施工人员的质量责任必须分明，严格按施工工艺要求和技术质量标准进行施工。

7.0.2 深层搅拌施工属隐蔽工程施工，施工完成后若存在质量缺陷则修补很困难。在施工过程中加强对各施工参数（水灰比、注浆压力、提升速度、转速等）的控制，是保证成桩质量的关键因素。

7.0.3 根据所加固土含水量、有机质含量等指标可选用不同类型的通用硅酸盐水泥，水泥的质量应符合相应的国家标准。

7.0.5 深层搅拌法成桩质量与施工机具的性能密切相关，施工机具的能力直接影响搅拌效果的好坏。搅拌机具选用经省部级鉴定认可、有合格生产资质的生产厂家生产的机具，是对工程施工质量的有力保障。

对搅拌深度和注浆流量进行自动记录，可最大程度降低施工质量的人为干扰，同时利用自动记录下的搅拌深度和注浆流量，参照提升速度可确定桩体每个部位的水泥掺入量，以此保证水泥掺入比。

7.0.8 对连续墙而言，两桩搭接处墙体厚度最薄，在进行质量评定时，将搭接处墙体厚度称为墙体有效厚度，并将其作为墙体厚度是否满足设计要求的评价指标。根据几何计算可知，桩位偏差和垂直度误差均发生在两桩连线两端时（见图 8、图 9），桩间搭接宽度最小，在施工中应保证此最小搭接宽度不小于有效墙厚，即满足下式：

$$d_e \geq 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{1}{2}l + \delta + h\varepsilon\right)^2} \quad (12)$$

式中:

$d_e$ ——有效墙厚, cm;

$R$ ——搅拌桩桩径, cm;

$l$ ——桩间距, cm;

$\delta$ ——桩位偏差, cm;

$h$ ——桩深, cm;

$\varepsilon$ ——垂直度, %。



图8 桩位立面图

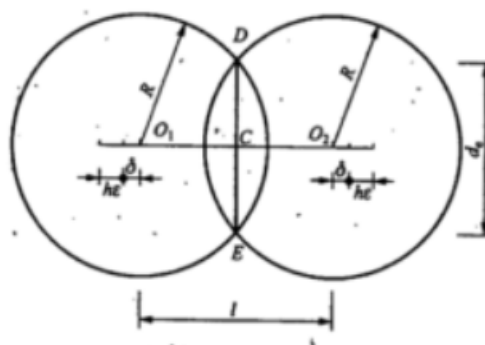


图9 桩位平面图

7.0.10 施工过程中控制水泥的掺入比，是深层搅拌施工过程中控制的一个重要指标。桩体质量的优劣与掺入加固土体中的水泥浆和搅拌的均匀性密切相关。施工中可按 6.4 工艺试验条文说明中式（11）推算水泥掺入比。



## 8 质量检验与验收

8.0.1 对桩体各项成桩参数进行检测，对不合格的桩应根据其位置和数量等具体情况，分别采用补桩或高喷处理措施。

8.0.2 轻型动力触探 (N10) 仅适用于成桩 3d 内的桩身均匀程度检验。由于每次落锤能量较小，连续触探一般不大于 4m。但是如果采用从桩顶开始至桩底，每米桩身先钻孔 700mm 深度，然后触探 300mm 并记录锤击数的操作方法，则触探深度可加大。

浅部开挖检查仅仅是浅部桩头部位的检测，目测其成桩大致情况，如成桩直径、搅拌均匀程度等。

复合地基载荷试验和单桩载荷试验是检测水泥土搅拌加固效果最可靠的方法之一。

8.0.4 无损检测只能用于配合其他检测方法对墙体质量进行综合评价，不宜以此方法检测结果直接作为判断墙体质量的依据。

8.0.3、8.0.5 实践证明，在地下水土层环境中，黏性土、淤泥质黏性土形成的水泥土，强度增长要比室内养护情况下缓很多，但试验表明最终强度是基本一致的。因此，钻孔取芯检测最好在成桩后 20d 内进行，然后把取得的芯样室内分别标准养护至 28d、90d，这样得出的 28d 和 90d 抗压强度与室内配比并养护的芯样所得到的抗压强度才具有可比性。在黏性土中形成的水泥土，当水泥土达到一定强度后，由于水泥土的不均匀性，钻孔取芯很难取出完整的芯样，因此在水泥土未达到一定强度时取芯有助于钻孔取样。

钻孔判断桩长，一般只适用于桩径大于 50cm 的搅拌桩。在钻孔取芯时容易出现偏斜，发生钻孔到桩体外部的现象，因此，对于小直径的搅拌桩，钻孔时应严格控制钻孔的垂直度。



155083.2300

销售分类建议：规程规范/  
水利水电工程/水力水电施工

DL/T 5425—2009

中华人民共和国电力行业标准

深层搅拌法技术规范

DL/T 5425—2009

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

2009年12月第一版 2009年12月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 1.875印张 48千字

印数 0001—3000册

统一书号 155083·2300 定价 9.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



