

ICS 27.140

P 59

备案号: J2668—2019



中华人民共和国电力行业标准

P

DL / T 5425 — 2018

代替 DL / T 5425 — 2009

深层搅拌法地基处理技术规范

Technical specification for deep mixing ground treatment

2018-12-25 发布

2019-05-01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国电力行业标准

深层搅拌法地基处理技术规范

Technical specification for deep mixing ground treatment

DL / T 5425 — 2018

代替 DL / T 5425 — 2009

主编机构：中国电力企业联合会

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2019 年 5 月 1 日

中国电力出版社

2019 北 京

中华人民共和国电力行业标准
深层搅拌法地基处理技术规范

Technical specification for deep mixing ground treatment

DL / T 5425 — 2018

代替 DL/T 5425 — 2009

*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天泽润科贸有限公司印刷

*

2019 年 11 月第一版 2019 年 11 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 2.375 印张 54 千字

印数 001—500 册

*

统一书号 155198 · 1691 定价 **36.00** 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

国家能源局

公 告

2018 年 第 16 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52 号）有关规定，经审查，国家能源局批准《光伏发电工程地质勘察规范》等 204 项行业标准，其中能源标准（NB）32 项、电力标准（DL）172 项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2018 年 12 月 25 日

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
...							
190	DL/T 5425—2018	深层搅拌法地基处理技术规范	DL/T 5425—2009		中国电力出版社	2018-12-25	2019-05-01
...							

前 言

本标准根据国家能源局《关于下达 2014 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2014〕298 号）的要求，对《深层搅拌法技术规范》DL/T 5425—2009（以下简称原标准）进行修订。

本标准在编制过程中，编制组经过广泛调查研究，认真总结实践经验，与国内相关标准协调，并在广泛征求意见的基础上进行修改。

本标准共分为 7 章，修改的主要内容有：

- 对软弱下卧层验算进行了修改。
- 增加了其他建（构）筑物与水泥土防渗墙连接的设计要求。
- 增加了低温施工的技术要求。
- 修改了支护挡墙的设计要求。
- 增加了粉体搅拌法施工的有关规定。
- 修改了施工质量验收的技术要求。

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（DL/TC 29）归口。

本标准主编单位：北京振冲工程股份有限公司

本标准参编单位：长江水利委员会长江工程建设局

本标准主要起草人：于洪治 熊 进 刘保平 张志伟
罗恒凯 王满兴 赵鹏飞 徐海荣
李晓力 仇 果 马小宇 姜本红
姚军平 崔一丁 占世斌 何 俊
卢 伟 王文鹏 王天云 赵建强
王永安 陈安庆 李声平

本标准主要审查人：汪 毅 楚跃先 李福生 黄晓辉
刘冬霓 席 浩 蔡启光 徐 军
温彦锋 罗维成 张文山 杨成文
涂怀健 苏小明 沈益源 周怀普
陈振华 刘瑞源 郭光文 余 英
田育功 肖恩尚 徐炎兵 赵振庆

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管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

目 次

前言 II

1 总则 1

2 术语 2

3 基本规定 3

4 设计 4

 4.1 一般规定 4

 4.2 复合地基设计 4

 4.3 防渗墙设计 7

 4.4 支护挡墙设计 8

5 施工 10

 5.1 一般规定 10

 5.2 施工设备 10

 5.3 施工准备 11

 5.4 工艺试验 11

 5.5 施工作业 12

6 施工质量控制 14

7 质量检验 16

附录 A 水泥土室内试验 20

附录 B 深层搅拌施工记录格式 22

本规范用词说明 27

引用标准名录 28

条文说明 29

Contents

Foreword	II
1 General provisions	1
2 Terms	2
3 Basic requirements	3
4 Design	4
4.1 General requirements	4
4.2 Composite foundation design	4
4.3 Cut-off wall design	7
4.4 Retaining wall design	8
5 Construction	10
5.1 General requirements	10
5.2 Construction equipment	10
5.3 Construction preparation	11
5.4 Technological test	11
5.5 Construction	12
6 Construction quality control	14
7 Inspection	16
Appendix A Laboratory experimental of cement soil	20
Appendix B Deep mixing construction record format	22
Explanation of wording in this specification	27
List of normative standards	28
Addition: explanation of provisions	29

1 总 则

1.0.1 为规范水电水利工程深层搅拌法的地基处理设计、施工、质量控制、质量检验等的技术要求，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水电水利深层搅拌法地基处理工程。

1.0.3 深层搅拌法进行地基处理除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 深层搅拌法 deep mixing method

利用深层搅拌机械将水泥浆或水泥等材料与土体强制搅拌，在土体内产生物理或化学反应，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、防渗墙或支护挡墙的施工方法。按材料喷射状态可分为浆液搅拌法（以下简称湿法）和粉体搅拌法（以下简称干法）。

2.0.2 深层搅拌桩 deep mixing column

深层搅拌法处理土体后，由水泥或水泥浆等材料和土体共同形成的一定强度的、具有整体性和水稳定性的柱状增强体。

2.0.3 深层搅拌水泥土墙 deep mixing cement-soil cut-off wall

由连续套接咬合搅拌桩组成的墙体状复合增强体，有防渗止水功能时则称为水泥土防渗墙。

2.0.4 深层搅拌桩复合地基 deep mixing column composite foundation

深层搅拌桩增强体与周围地基土所形成的复合地基。

2.0.5 深层搅拌桩复合土体 composite soil with deep mixing column

深层搅拌桩增强体与周围地基土组成的等效土体。

2.0.6 水泥掺入比 cement-mixed ratio

深层搅拌增强体内水泥与原状土体的质量比值。

3 基 本 规 定

3.0.1 应根据建（构）筑物的技术要求、建设场地工程地质条件、搅拌机具和施工工艺等，对深层搅拌法进行可行性和经济合理性论证。

3.0.2 深层搅拌法适用于黏土、粉土、砂土，以及淤泥质土和淤泥、素填土等土层。

3.0.3 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，应通过试验确定其适用性。

3.0.4 对于泥炭质土、有机质土、塑性指数大于 25 的黏土、pH 值小于 4 的酸性土、含砾土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其适用性。

3.0.5 当地基土的天然含水量小于 30%（黄土含水量小于 25%）时不宜采用干法施工。

3.0.6 深层搅拌法的处理深度应根据地层情况和设备性能确定。

3.0.7 采用深层搅拌法进行地基处理时，应搜集土层的分布范围、厚度、组成、物理力学性质、有机质含量、透水层及相对不透水层位置、地下水位及侵蚀性等工程地质和水文地质资料。

4 设 计

4.1 一 般 规 定

4.1.1 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。增强体的基本形状为柱状，桩体连续套接咬合时可分为壁状、格栅状或块状等。

4.1.2 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加剂，为设计确定配比参数。

4.1.3 深层搅拌法所使用的水泥宜选用通用硅酸盐水泥，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%，地质条件复杂时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加剂。

4.1.4 水泥土的抗压强度、压缩模量、渗透系数等试验龄期宜取 90d。

4.1.5 土的物理力学性质指标测试应符合《土工试验方法标准》GB/T 50123 和《土工试验规程》SL 237 的有关规定。

4.2 复 合 地 基 设 计

4.2.1 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，确定搅拌桩的布置方式、置换率、桩长以及掺入比。

4.2.2 单桩竖向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的工程经验按式（4.2.2-1）和式（4.2.2-2）初步计

算，并取其较小值。

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (4.2.2-1)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (4.2.2-2)$$

式中： R_a ——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 层土的桩侧摩阻力特征值 (kPa)，宜按地区经验取值；

l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度 (m)；

α ——桩端天然地基土的承载力折减系数，宜按地区经验取值；

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力特征值 (kPa)，可按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定确定；

A_p ——搅拌桩的截面积 (m²)；

η ——桩身强度折减系数，干法施工取 0.2~0.3、湿法施工取 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)，在标准养护条件下 28d 龄期的立方体抗压强度平均值 (kPa)。

4.2.3 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 (4.2.3) 估算。

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (4.2.3-1)$$

$$m = \frac{d_0^2}{d_e^2} \quad (4.2.3-2)$$

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；
 d_0 ——桩径 (m)；
 d_e ——单桩分担地基处理面积的等效圆直径 (m)，
 等边三角形布桩 $d_e = 1.05s$ ，正方形布桩 $d_e = 1.13s$ ，矩形布桩 $d_e = 1.13\sqrt{s_1s_2}$ ；
 s 、 s_1 、 s_2 ——分别为桩的间距 (m)、纵向间距 (m)、横向间距 (m)；
 β ——桩间土承载力折减系数，宜按地区经验取值，对于淤泥、淤泥质土和流塑状软土等处理土层可取 0.1~0.4，对其他土层可取 0.4~0.8，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。

4.2.4 加固设计时可根据地基承载力要求，按式 (4.2.4) 估算搅拌桩的面积置换率 m ：

$$m = \frac{f_{\text{spk}} - \beta f_{\text{sk}}}{\frac{R_a}{A_p} - \beta f_{\text{sk}}} \quad (4.2.4)$$

4.2.5 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 (4.2.5) 计算，独立基础下的桩数不宜少于 4 根。柱状加固可采用正方形、等边三角形等布桩形式。

$$N = \frac{mA}{A_p} \quad (4.2.5)$$

式中： N ——布桩总数 (根)；
 A ——上部结构物基础底面积 (m^2)。

4.2.6 在搅拌桩处理深度范围以下存在软弱下卧层时，应按《建

筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定进行软弱下卧层地基承载力验算。

4.2.7 搅拌桩复合地基的沉降应按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定进行计算，复合地基压缩模量按式(4.2.7)计算。

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (4.2.7)$$

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。

4.2.8 竖向承载搅拌桩复合地基应在基础和复合地基之间设置垫层。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土，水泥掺量不应小于 20%，并保证水泥土搅拌的均匀性及铺垫的施工质量。

4.2.9 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 1/3 桩长范围内可适当增加水泥掺量及搅拌次数；桩身下部 1/3 桩长范围内可适当减少水泥掺量。

4.3 防 渗 墙 设 计

4.3.1 防渗墙的设计应按建（构）筑物的防渗要求，确定水泥土防渗墙体的位置、厚度、深度以及水泥土防渗墙的性能指标，并应满足《堤防工程设计规范》GB 50286 要求。

4.3.2 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。

4.3.3 防渗墙的有效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。设计时可按简化式(4.3.3)进行计算,以初步确定墙厚。

$$S = \eta_j \frac{\Delta H}{[J]} \quad (4.3.3)$$

式中: S ——水泥土防渗墙的有效厚度的计算值(m),取值不宜小于0.15m;

ΔH ——墙体两侧水头差(m);

$[J]$ ——水泥土允许比降,可取破坏比降的1/3~1/2;

η_j ——系数,可取1.1~1.4。

4.3.4 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0.5m~1.0m。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作为延长渗径的处理。

4.3.5 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。

4.3.6 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。

4.3.7 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。

4.3.8 水泥土防渗墙间、水泥土防渗墙与其他建筑物的连接部位,可采用高压摆喷或高压旋喷等方法处理,轴线方向搭接不小于0.5m,深度方向搭接不小于1.0m。

4.4 支护挡墙设计

4.4.1 水泥土墙适用于开挖深度小于7m的支护挡墙。

4.4.2 水泥土挡墙结构可布置为格栅、块状、壁状等形式。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。

4.4.3 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。

4.4.4 水泥土挡墙支护结构应按重力式挡墙设计，可按照《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 中有关规定计算。

1 桩长应超过危险滑弧以下 2.0m。

2 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。

3 支护挡墙抗倾覆安全系数不应小于 1.3，抗滑动稳定性安全系数不应小于 1.2，整体稳定性安全系数不应小于 1.3。

4.4.5 当坑底为饱和软土时，应进行坑底抗隆起验算，并应进行渗流稳定验算。

5 施 工

5.1 一 般 规 定

5.1.1 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。

5.1.2 施工前应制订施工组织设计，并进行工艺试验。

5.1.3 防渗墙施工前宜布设超前探孔。超前探孔沿防渗墙轴线间距以 50m 为宜，地质条件复杂时可适当加密。超前探孔应深入设计防渗墙底以下 5m。

5.2 施 工 设 备

5.2.1 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。对于水泥土支护挡墙与防渗墙工程宜采用多头深层搅拌施工设备。

5.2.2 搅拌头翼片的枚数和宽度、翼片与搅拌轴的夹角、搅拌头转速、提升速度应相匹配。

5.2.3 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 主卷扬机多级调速功能。
- 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 施工设备应配备流量仪、深度仪等自动计量仪器。

7 在搅拌深度超过 20m 时，应在搅拌轴中部位置的立柱导向架上安装移动式定位导向装置。

5.2.4 湿法施工时，注浆泵的额定工作压力不宜小于 5.0MPa，排浆量应满足施工工艺参数需要，工作流量应可调节。

5.2.5 干法施工时，根据配合比确定掺入比和钻头提升速度及钻机的转速，并选定合适的粉体发送量。空气压缩机的选定依据工程的地质条件及加固深度确定，压力不宜小于 0.5MPa。

5.2.6 制供浆（粉）设备的能力应满足桩（单元墙）体用浆（粉）量的要求。

5.3 施 工 准 备

5.3.1 深层搅拌法施工场地应平整，低洼处应回填细粒土料找平，不得回填杂填土，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处理地上、地下设施及障碍物，并沿防渗墙轴线方向开挖导向沟，沟深 0.5m~1.0m，宽度与防渗墙厚度相适应。

5.3.2 施工前应完成施工测量放样。

5.3.3 湿法施工前应标定深层搅拌机械的灰浆泵输浆量、灰浆经输浆管送达搅拌机喷浆口的时间和起吊设备提升速度等施工参数，并根据设计要求通过成桩（墙）试验，确定搅拌桩（墙）的配比和施工工艺。

5.3.4 干法施工前，应检查搅拌机械、供粉泵、送气（粉）管路、接头和阀门的密封性、可靠性，送气（粉）管路的长度不宜大于 60m。

5.3.5 水泥掺入比应通过室内试验确定，试验方法见附录 A。

5.3.6 外加剂和掺合料应通过室内试验检验。

5.4 工 艺 试 验

5.4.1 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，内容主要包括：

- 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（或水泥掺入量）。
- 3 搅拌桩机转速、下钻和提升速度。
- 4 注浆泵压力（或喷灰压力）。
- 5 输浆量（或供灰量）及每延米桩体注浆量（或供灰量）。
- 6 冲水或注水下钻，复搅复喷及其部位等。

5.4.2 复合地基工艺试验，搅拌桩不应少于 3 根，多头深层搅拌施工不得少于 3 组；防渗墙和支护挡墙工艺试验应形成轴线长为 3m~5m 的墙体。

5.4.3 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。

5.5 施 工 作 业

5.5.1 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，其常规工序为“二喷四搅”：

- 1 搅拌机就位、调平。
- 2 钻进下沉至设计加固深度。
- 3 边喷浆（或粉）、边搅拌提升直至预定的停浆（或灰）面。
- 4 重复搅拌下沉至设计加固深度。
- 5 边喷浆（或粉）、边搅拌提升直至预定的停浆（或灰）面。
- 6 停机移位。

5.5.2 深层搅拌法用于防渗墙、支护挡墙施工时，施工方式有二次成墙、一次成墙等方式。

二次成墙工序为：

- 1 搅拌机就位、调平。
- 2 开启输浆泵喷浆，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 重复搅拌下沉至设计加固深度。

5 喷浆或仅搅拌提升直至预定的停浆面。

6 纵向移动机械，按要求的搭接尺寸就位、调平。

7 重复本条 1~5 的工作步骤，完成第 2 序桩施工，形成一个单元墙。

8 重复本条 1~7 的工作步骤，完成第 2 个单元墙施工。

当采取一次成墙方式时，只进行本条 1~6 工作步骤。

5.5.3 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。

5.5.4 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、喷浆下沉、适量冲水搅拌下沉等方式。

5.5.5 施工参数应符合工艺试验所确定的参数。

5.5.6 施工过程中必须连续供浆。固化剂浆液应严格按预定的配比拌制，制备好的浆液不得离析，浆液倒入集料斗时应加筛过滤。拌制浆液的罐数、固化剂与掺合料的用量以及泵送浆液的时间等应有专人记录。

5.5.7 因故停工，按如下方法进行处理：

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

2 当湿法施工时，若停工时间较长，无法下沉至停浆搅拌点以下 0.5m 时，可采取以下方法处理：

1) 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。

2) 采用高压摆喷或高压旋喷方法，连接两段深层搅拌防渗墙。

5.5.8 搅拌桩施工时，停浆（灰）面应高于设计桩顶高程 300mm~500mm。

5.5.9 施工记录应有专人负责，施工记录格式见附录 B。

5.5.10 被加固土为密实的砂土时，可采用空气压缩机输送高压气体，促进搅拌的水泥浆和土充分混合，减少土体对搅拌的阻力。

6 施工质量控制

6.0.1 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。

6.0.2 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、水泥浆液密度、供浆流量等参数，保证掺入比满足设计要求且搅拌均匀。

6.0.3 水泥质量应符合《通用硅酸盐水泥》GB 175 及其他水泥标准的规定。搅拌水泥浆液所用水应符合混凝土拌和用水要求。选用水泥应按批次做质量检测。

6.0.4 外加剂和掺合料产品应严格按室内试验和现场试验确定的种类和用量进行控制。

6.0.5 搅拌设备应配备经计量认证的监测计量仪器。

6.0.6 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。

6.0.7 单桩施工搅拌桩的垂直偏差不得超过 1%，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，无搭接要求的桩位偏差不得大于 50mm；垂直度及桩位偏差每个机位均应检测。

6.0.8 成桩直径和桩长不得小于设计值。对于防渗墙施工，垂直度偏差、桩位偏差控制应能保证墙体有效墙厚满足设计要求。

6.0.9 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℃ 以上时，不应超过 3h，气温在 10℃ 以下时浆液存放不应超过 4h。超过存放时间

时，应作弃浆处理。冬季施工时，搅拌用水应进行加热，并采取保温措施。

6.0.10 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立即查找原因并及时修正。

6.0.11 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。施工中发现的问题及处理情况均应注明。

6.0.12 施工记录应及时、准确、完整、清晰。

6.0.13 施工的关键工序、重要部位和现场检验检测时，宜留存影像资料。

7 质 量 检 验

7.0.1 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。

7.0.2 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 成桩 7d 后，采用浅部开挖桩头至超过停浆面下 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或单桩载荷试验。载荷试验应在桩身强度满足试验荷载条件时，并宜在成桩 28d 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。

7.0.3 基槽开挖后，应检验桩位、桩数、桩径与桩体质量。

7.0.4 竖向承载搅拌桩地基质量检验标准应符合表 7.0.4 的规定。

表 7.0.4 竖向承载搅拌桩地基质量检验标准

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	水泥质量	设计要求		查产品合格证书或抽样送检
	2	水泥用量	参数指标		查看计量装置
	3	桩体强度	设计要求		按规定办法
	4	地基承载力	设计要求		按规定办法

续表 7.0.4

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
一般项目	1	桩底标高	mm	± 200	测机头深度
	2	桩顶标高	mm	$+100$ -50	水准仪
	3	桩位偏差	mm	条形基础边桩: 沿轴线 $\pm 1/4D$, 沿垂直轴线 $\pm 1/6D$; 其他情况: $\pm 0.4D$	用钢尺量, D 为桩径
	4	桩径		$<0.04D$	用钢尺量, D 为桩径

7.0.5 对于防渗墙和支护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试验, 防渗墙还应进行渗透系数、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。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, 防渗墙还应进行渗透系数、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。

7.0.6 防渗墙和支护挡墙质量检验标准和方法见表 7.0.6-1 和表 7.0.6-2。

表 7.0.6-1 防渗墙质量检验标准和方法

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	水泥质量	设计要求		查产品合格证书或抽样送检
	2	水泥用量	参数指标		查看计量装置
	3	渗透系数	设计要求		按规定办法
	4	桩间搭接长度	设计要求		用钢尺量
一般项目	1	墙顶标高	mm	+100 -50	水准仪
	2	墙底标高	mm	±200	钻孔或物探
	3	墙体强度	设计要求		按规定办法

表 7.0.6-2 支护挡墙质量检验标准和方法

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	水泥质量	设计要求		查产品合格证书或抽样送检
	2	水泥用量	参数指标		查看计量装置
	3	墙体强度	设计要求		按规定办法
	4	桩间搭接长度	设计要求		用钢尺量
一般项目	1	墙顶标高	mm	+100 -50	水准仪
	2	墙底标高	mm	±200	钻孔或物探
	3	轴线偏差	mm	≤1/6D	用钢尺量，D 为桩径

7.0.7 工程完工后应提交以下资料：

- 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

水泥土室内试验

A.0.1 水泥土室内试验目的

- 1 确定满足工程要求的水泥土材料配比。
- 2 测定材料及试件性能参数。

A.0.2 试块的制作和养护

1 室内水泥土试块制作

在施工场地选取天然土样（密封）及施工实际使用的水泥、外加剂、掺合料和拌和水，制备样品，在标准养护条件下养护。抗压强度试块尺寸为 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ ；渗透系数的试块尺寸为上口直径 70mm ，下口直径 80mm ，高度 300mm 。在标准养护条件下，试样养护龄期宜为 28d 。

2 现场取样方法

- 1) 成桩 90d 龄期后进行取样试验。
- 2) 开挖取样，加工制作成 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ 尺寸试块。
- 3) 钻孔取芯样，按高径比为 $1:1$ 制备样品。

A.0.3 抗压强度试验

1 从养护室取出达到要求龄期的试块，称重后用压力试验机测定无侧限抗压强度。

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.0.4 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。

A.0.5 试验方法可参照《土工试验方法标准》GB/T 50123、《土工试验规程》SL 237 和《水工混凝土试验规程》SL 352 的有关规定执行。

附录 B
深层搅拌施工记录格式

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（掺入量）_____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 （灰） 时间	停浆 （灰） 时间	总喷浆 （灰） 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 （灰） 提升																								
		重复 下沉																								
		重复 提升																								
		预搅 下沉																								
		喷浆 （灰） 提升																								
		重复 下沉																								
		重复 提升																								
		预搅 下沉																								

续表 B.1

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 (灰) 时间	停浆 (灰) 时间	总喷浆 (灰) 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									
		喷浆 (灰) 提升																								
		重复 下沉																								
		重复 提升																								

班长_____ 操机工_____ 司泵工_____ 记录员_____

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 (灰) 管道 走浆 (灰) 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 (灰) 时间	泵前 管内 状态	泵后 管内 状态	备注

司泵工_____

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 (灰) 时间	施工 记录 页数	备注

资料员_____

表 B.4 深层搅拌桩防渗墙（支护挡墙）施工记录表

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

水泥 标号			水灰比					孔深			
单元 墙号	序 号	对位偏差 (mm)	调平偏差 (mm)			来浆时间 (时 分 秒)	停浆时间 (时 分 秒)	喷浆 总时 (min)	喷浆量		备注
			左	中	右				(L)	(kg)	
	I										
	II										

续表 B.4

水泥 标号						水灰比				孔深		
单元 墙号	序 号	对位偏差 (mm)	调平偏差 (mm)			来浆时间 (时 分 秒)	停浆时间 (时 分 秒)	喷浆 总时 (min)	喷浆量		备注	
			左	中	右				(L)	(kg)		
	I											
	II											
	I											
	II											
	I											
	II											
	I											
	II											
	I											
	II											

班长：

记录员：

质检员：

表 B.5 深层搅拌桩防渗墙制浆记录表

工程名称_____ 地面高程_____m 日期_____ 班次_____

水泥 标号		水灰比		加水量 (L)		加灰量 (kg)	
接班余浆量 (L)			交班余浆量 (L)			本班消耗 水泥 (t)	
序号	开始 (时 分)	结束 (时 分)	浆量 (L)	序号	开始 (时 分)	结束 (时 分)	浆量 (L)

续表 B.5

水泥 标号		水灰比		加水量 (L)		加灰量 (kg)	
接班余浆量 (L)			交班余浆量 (L)			本班消耗 水泥 (t)	
序号	开始 (时 分)	结束 (时 分)	浆量 (L)	序号	开始 (时 分)	结束 (时 分)	浆量 (L)
合计用浆量: L							

班长:

记录员:

质检员:

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的用词:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 规范中指明应按其他有关标准、规范执行时,写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 《岩土工程勘察规范》 GB 50021
- 《土工试验方法标准》 GB/T 50123
- 《堤防工程设计规范》 GB 50286
- 《水利水电工程地质勘察规范》 GB 50487
- 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
- 《建筑地基处理技术规范》 JGJ 79
- 《建筑基坑支护技术规程》 JGJ 120
- 《土工试验规程》 SL 237
- 《水工混凝土试验规程》 SL 352

中华人民共和国电力行业标准

深层搅拌法地基处理技术规范

DL / T 5425 — 2018

代替 DL / T 5425 — 2009

条 文 说 明

修 订 说 明

本规范根据国家能源局《关于下达 2014 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2014〕298 号）的要求，对《深层搅拌法技术规范》DL/T 5425—2009 进行修订。

本规范的主要技术内容包括设计、施工、施工质量控制、质量检验。

随着我国基础设施建设的发展，深层搅拌技术得到了较为广泛的应用，特别是在水电水利防渗工程、地基处理工程以及水利工程中得到了较为广泛的应用，积累了大量的实践经验。进一步规范了深层搅拌桩复合地基软弱下卧层验算方法；增加了分段水泥土防渗墙间以及水泥土防渗墙与其他建（构）筑物间连接等设计要求；增加了低温施工的技术要求；依据挡墙使用功能，修订了支护挡墙的设计要求；考虑到粉体搅拌法应用的实际情况，增加了粉体搅拌法施工的有关规定；修订了施工质量验收的技术要求，进一步规范了施工质量验收标准；对附录 A、附录 B 中的施工表格进行了修改。

近年来，深层搅拌法施工技术如施工机具、施工工艺、检测技术等都有较快的发展。随着制造业的快速发展，我国已生产出施工深度超过 35.0m、桩径不小于 1.0m 的深层搅拌施工设备，在设备整体稳定性、钻进能力、钻具改进等方面均得到了显著的发展，在许多大型工程中得到了广泛应用，积累了一定的工程经验，机械制造水平的提高促进了施工技术的发展。本次修订取消了原规范施工深度的有关规定，同时，鼓励在施工质量通过试验验证的条件下，推广采用施工能力更强的新设备、新工艺。

目 次

1	总则	32
3	基本规定	34
4	设计	36
4.1	一般规定	36
4.2	复合地基设计	38
4.3	防渗墙设计	44
4.4	支护挡墙设计	47
5	施工	49
5.1	一般规定	49
5.2	施工设备	50
5.3	施工准备	53
5.4	工艺试验	56
5.5	施工作业	57
6	施工质量控制	61
7	质量检验	64

1 总 则

1.0.1 深层搅拌法是国内应用较普遍和有效的地基处理方法。采用深层搅拌法地基处理技术，可以达到提高地基承载力、减小建（构）筑物地基沉降量、基坑支档维护、防渗止水的目的。在总结经验的基础上，为了更好地指导工程实践，编制适用于水电水利工程特点的深层搅拌法地基处理技术规范，使设计、施工、质量控制、质量检测等具有科学性、实用性和可操作性，做到技术标准统一，达到安全、经济及确保工程质量的目的。为规范深层搅拌法地基处理技术在水电水利工程中的应用制定本规范。

1.0.2 深层搅拌技术引入我国以来，在水利水电、火力发电、石油化工、交通运输以及工业与民用建筑工程中均得到了较为广泛的应用，深层搅拌法水泥土防渗墙施工技术首先在水电水利工程中得到了较大规模的应用，2000年在长江大堤加固工程中，采用多头搅拌施工技术完成了达100万 m^2 的防渗墙工程，此后，随着施工工艺的改进、设备制造能力的提高，我国已生产出施工深度超过35.0m、桩径不小于1.0m的多头深层搅拌施工设备，在设备整体稳定性、钻进能力、钻具改进等方面均得到了显著的发展。本标准适用于水电水利深层搅拌法地基处理工程，其他地基处理工程可参照使用。

本标准主要针对水电水利工程深层搅拌法地基处理技术做出规定。根据水电水利工程规模大、工程地质条件复杂等特点，在修订过程中，结合近年来国内外深层搅拌技术和施工设备的发展状况，既吸取了其他工程的建设经验，又体现了水电水利工程的特点和重要性。本标准规定了水电水利深层搅拌法地基处理工程的设计、施工、质量控制、检测与验收等。

1.0.3 本标准在体现水电水利工程特点的基础上，修订过程中尊重现行相关标准并与之协调，因此，深层搅拌法地基处理应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

3 基本规定

3.0.1 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，达到相应的处理效果，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做出评价。

3.0.2 深层搅拌法适用于加固黏土、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，使土体硬化凝结成具有整体性、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。

3.0.3 作为竖向承载桩时，深层搅拌桩处理欠固结土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。

3.0.4 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土以及有机质含量高、pH 值较低的黏土加固效果较差。

当黏土的塑性指数 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 的含量一般不应大于 15%，以免影响搅拌效果。

对于地下水中含有大量硫酸盐(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。

由于影响深层搅拌施工质量的因素较为复杂,因此规定应通过现场试验验证技术方案的可靠性。

3.0.5 当地基土的天然含水量小于 30% (黄土含水量小于 25%) 时,由于不能保证水泥充分水化,故不宜采用干法施工。

3.0.6 深层搅拌法的干法处理深度一般不宜大于 15m,湿法处理深度一般不宜大于 25m,目前,防渗墙施工深度已达 25m。

深层搅拌法的处理深度主要与地层情况和设备的能力有关,国内也已研制出单钻头、双钻头和多钻头等不同类型,施工深度达到 35m、桩径不小于 1.0m 的深层搅拌施工机械。

考虑到水电水利行业地质条件的复杂性,本规范不再对处理深度做具体规定,但在设计处理深度时,应做具体的分析与试验论证。对于以提高复合地基承载力为主要目的的地基处理工程,施工深度一般应控制在 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。对于深度较大的防渗墙工程,应重点强调施工设备垂直度控制性能、施工作业面硬化情况等综合分析论证。

4 设 计

4.1 一 般 规 定

4.1.1 深层搅拌法所形成水泥土增强体的物理力学性质指标、防渗等性能指标显著优于原地基土，可用于地基加固、竖向承载、支挡、止水等多种功能。搅拌桩复合地基可用于建（构）筑地基处理工程；格栅状、壁状等搅拌桩结构可作为重力式水泥土墙用于基坑支护工程；咬合搅拌桩形成连续墙体用于防渗工程；在水电水利工程中，采用深层搅拌法形成水泥土防渗墙处理围堰、堤坝的防渗问题，作为复合地基以提高堤坝等建（构）物地基承载力与稳定性。

当采用 SMW 法（在搅拌桩中插入型钢）作为围护结构时，有利于提高基坑的开挖深度、降低支护工程造价；深层搅拌法还可用于稳定或加固基坑（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。

4.1.2、4.1.3 水泥掺入比试验是设计过程的一个重要环节，采用水泥作为固化材料，在其他条件相同时，在同一土层中水泥掺入比不同，水泥土强度将不同。一般水泥掺入比采用 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水泥掺入比。对于块状加固的大体积处理工程，如果水泥土强度的设计要求不高，为了节约水泥，降低成本，一般可选用 7%~12% 的水泥掺比。

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~2.0MPa 及以上。

一般情况下，使用通用硅酸盐水泥，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%。

深层搅拌法工程广泛采用通用硅酸盐水泥作为固化材料，主要依据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 1 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 1 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。

外加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。

4.1.4 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，不同龄期的水泥石抗压强度间关系大致呈线性关系，其经验关系式如下：

$$f_{\text{cu}7} = (0.47 \sim 0.63)f_{\text{cu}28} \quad (4-1)$$

$$f_{\text{cu}14} = (0.62 \sim 0.80)f_{\text{cu}28} \quad (4-2)$$

$$f_{\text{cu}60} = (1.15 \sim 1.46)f_{\text{cu}28} \quad (4-3)$$

$$f_{\text{cu}90} = (1.43 \sim 1.80)f_{\text{cu}28} \quad (4-4)$$

$$f_{\text{cu}90} = (1.73 \sim 2.82)f_{\text{cu}14} \quad (4-5)$$

$$f_{\text{cu}90} = (2.37 \sim 3.73)f_{\text{cu}7} \quad (4-6)$$

式中： $f_{\text{cu}7}$ 、 $f_{\text{cu}14}$ 、 $f_{\text{cu}28}$ 、 $f_{\text{cu}60}$ 、 $f_{\text{cu}90}$ ——分别为 7d、14d、28d、60d、90d 龄期的水泥石抗压强度。

当龄期超过三个月后，水泥石强度增长缓慢。180d 的水泥石强度为 90d 的 1.25 倍，而 180d 后的水泥石强度增长仍未终止。综合考虑，本规范规定水泥石的抗压强度、压缩模量、渗透系数等试验龄期宜取 90d。

4.2 复合地基设计

4.2.1 从承载力角度考虑，提高置换率比增加桩长的效果更好。水泥石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。但过高的桩身强度不利于桩间土承载力的发挥。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，因此水泥石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，若水泥石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，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。

4.2.2 式(4.2.2-1)中桩周土的侧摩阻力特征值 q_{si} 是根据现场载荷试验结果和已有工程经验总结确定。一般淤泥可取 5kPa~8kPa；淤泥质土可取 8kPa~12kPa；软塑状的黏土可取 12kPa~18kPa；可塑状态的黏土可取 18kPa~24kPa。当无地区经验时可参考上述取值范围，并结合地基土的具体条件确定。

式(4.2.2-1)中桩端天然地基承载力折减系数 α 取值与施工时桩端施工质量及桩端土质等条件有关，推荐宜按地区经验取值。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(4.2.2-1)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特征值。

式(4.2.2-2)中加固土强度折减系数 η 是一个和工程经验、施工工艺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。目前在设计中一般干法施工取 0.2~0.3、湿法施工取 0.25~0.33。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 η 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 倍~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 (4.2.2-2)；4m~5m 以下桩身强度则可按桩体受力状态进行适当折减。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。

4.2.3 式 (4.2.3) 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 β 是反映桩土共同作用的一个参数，推荐宜按地区经验取值。当基础下加固土层为淤泥、淤泥质土和流塑状软土时，考虑到上述土层的固结程度差，桩间土难以发挥承载作用，所以 β 取值 0.1~0.4，其他土层可取 0.4~0.8。

桩身强度以及基础底面与复合地基间褥垫层对 β 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， β 可能大于 0.5。在基础和桩之间设置褥垫层时 β 可取高值。

实际加固设计时， β 系数还应根据建筑物对沉降要求而定。当建筑物对沉降要求较高时，即使桩端是软土， β 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， β 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，格栅状的布桩形式不仅能降低负摩擦力，而且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。

4.2.4 复合地基加固设计时，可按式（4.2.4）估算搅拌桩的面积置换率 m ，式中已知上部结构要求的地基承载力 f_{spk} ，根据式（4.2.2-1）和式（4.2.2-2）可初步计算得到单桩承载力 R_a ； 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 尚需根据上部结构形式和本规范要求具体布桩后确定。但 m 需不小于面积置换率的计算值。

4.2.5 水泥土桩的布置形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形式。

1 柱状：每隔一定距离打设一根水泥土桩，形成柱状加固形式，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形式，适用于防渗墙、基坑边坡支护以及对不均匀沉降比较敏感建筑物等地基处理工程。

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形式。适用于对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如图 4-1 所示的壁状或格栅状，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。

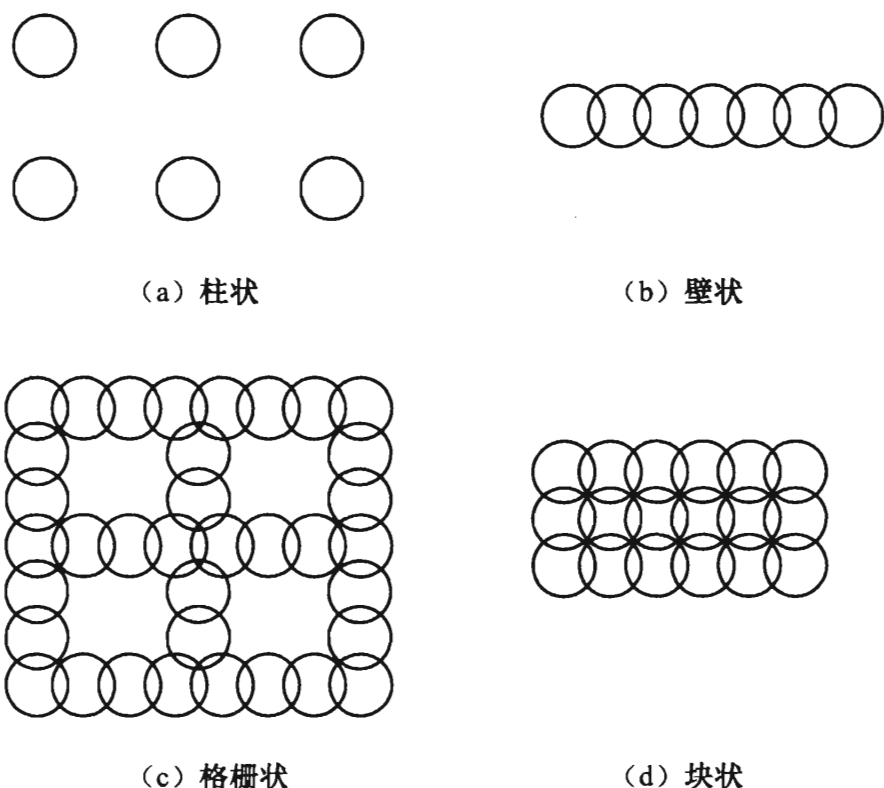


图 4-1 水泥土桩的布置形式

4.2.6 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，验算方法按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 执行。

4.2.7 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（4.2.7）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，根据经验黏土可取 $(100 \sim 120) f_{cu}$ (kPa)，砂性土可取 $(120 \sim 200) f_{cu}$ (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压缩模量，一般为 15MPa~25MPa，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，复合地基压缩模量一般均大于式（4.2.7）的计算值。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 10mm~50mm 间。

复合地基沉降量应按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定进行计算。

4.2.8 在刚性基础和复合地基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 β 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%。

4.2.9 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。

桩身强度也不宜太高。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），适当进行复搅工艺对提高桩体强度有较好效果。

4.3 防 渗 墙 设 计

4.3.2 本条文规定了一般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一道组成一个完整的防渗体系。

4.3.3 水泥土防渗墙有效厚度与作用水头、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，通常是依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，以期通过该式给出有效墙厚的一个初值。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（4.3.3）中， ΔH 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，根据当地工程经验、工程地质条件、建筑物级别及其重要性确定 $[J]$ 取值； ΔH 和 $[J]$ 试验确定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，一般通过搅拌桩的搭接长度控制水泥土墙的最小有效厚度值。

式（4.3.3）中系数 η_j 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。

4.3.4 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，由于地层层面多呈水平向，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有所提高，曾有施工深度达 35m 的工程实例。在相对不透水土层埋深较深时，或下部是砂砾石层、卵砾石等复杂地层时，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。成墙平面示意图如图 4-2 所示。

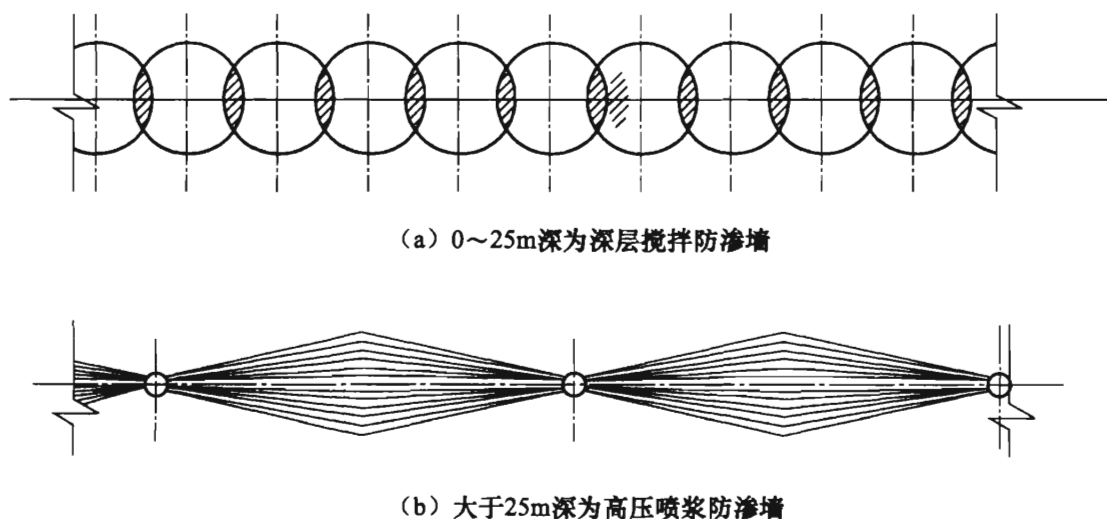


图 4-2 0~25m 和大于 25m 成墙平面示意图

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 1.0m，施工时搭接段范围内采取摆喷和旋喷结合的办法确保搭接。其平面示意图如图 4-3 所示。

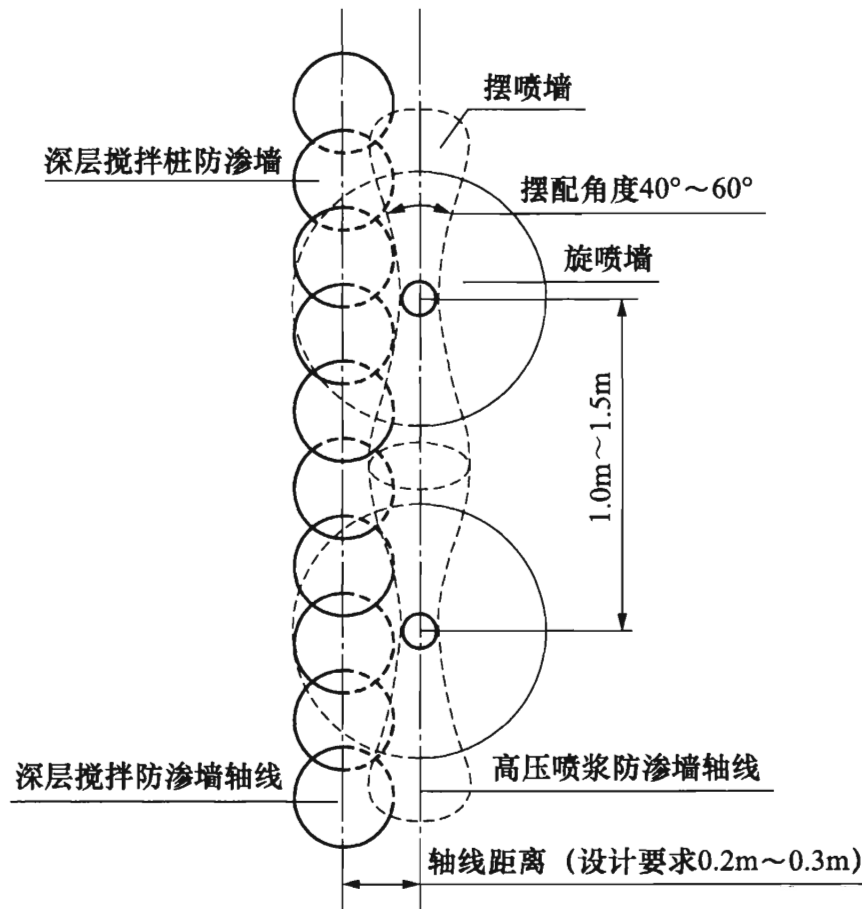


图 4-3 搭接处成墙平面搭接图

4.3.6 作为防渗墙，其功能主要是防渗，因此其渗透性指标是最为重要的技术指标之一。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），相对渗透性越小，防渗效果越好。水泥土的渗透稳定性问题，目前还是参照无黏土用允许比降来衡量。但水泥土与无黏土有着本质的区别，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，允许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，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。

4.3.7 当水头差较大时，水泥土防渗墙的有效厚度、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。

4.3.8 实践经验表明，对于水泥土防渗墙与其他建（构）筑物、分段水泥土防渗墙的连接部位，可采用高压摆喷或高压旋喷的方法处理，并保持一定的搭接长度，以确保防渗体系的整体性。

4.4 支 护 挡 墙 设 计

4.4.1 我国近几年，深层搅拌法被广泛用于 5m~7m 深基坑围护结构，这种围护结构多采用格栅形式，其作用相当于重力坝式挡墙。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。

4.4.4 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 4-4（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 4-4（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 4-4（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。

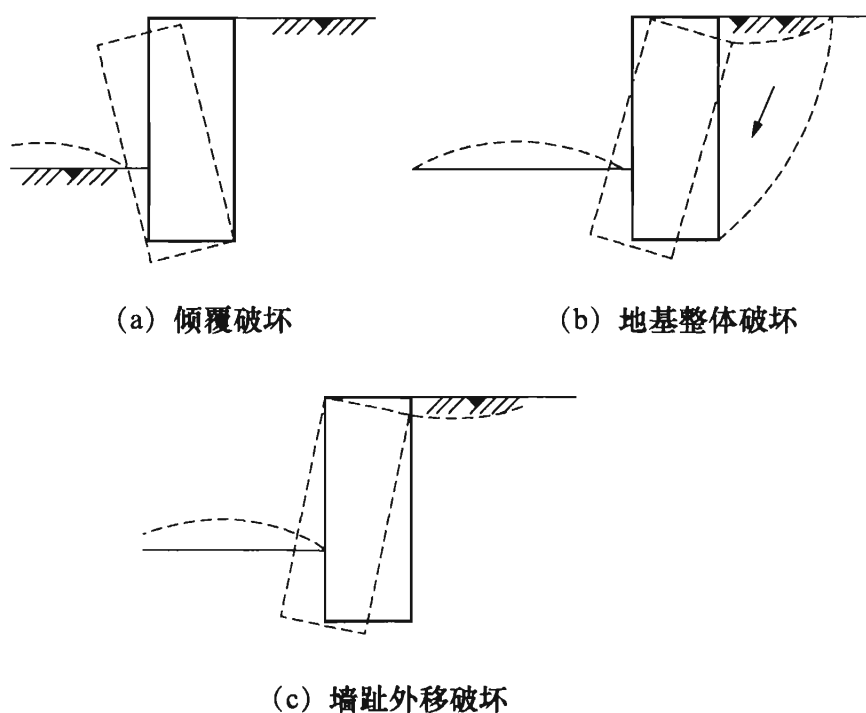


图 4-4 水泥土挡墙的破坏形式

抗倾覆安全系数 K_q 取值一般为 1.3。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_h 取值一般为 1.2。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 $K \geq 1.3$ 。

5 施 工

5.1 一 般 规 定

5.1.1 由于地质资料、地下障碍构筑物不详或对临近建筑物和设施没有充分重视而造成的质量事故或邻近建筑物、公共设施的破坏事故屡有发生，因此施工前应掌握必要的资料，分析其相互的影响，必要时应采取措减小或消除其影响。

5.1.2 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及一些异常现象的处理方法。

工艺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。

在工艺试桩过程中，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，若芯样样本数量满足统计学要求，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。若试验样本不满足统计要求，可利用本规范条文说明 5.1.4 中提出的不同龄期的水泥石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。

工艺试验的同时，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深层搅拌法加固。

5.1.3 一般情况下，复合地基处理和基坑支护地质勘探孔较密，不需布设超前探孔，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，还要进行补充超前探孔，钻探方法参照《岩土工程勘察规范》GB 50021 以及《水利水电工程地质勘察规范》GB 50487 有关规定执行。超前探孔间距一般为 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，与设计资料比对，如防渗墙设计深度未达到不透水层或相对不透水层，应将具体情况报建设单位，需要变更设计的，报设计批准。

5.2 施 工 设 备

5.2.1 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。

对于水泥土支护挡墙与防渗墙工程，应按照墙体最小厚度或搅拌桩搭接长度、施工深度等设计要求，选择满足功能性要求的施工设备。为提高施工工效以及施工质量的稳定性，推荐采用多头搅拌设备。

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，则最小钻头直径为 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 5-1 所示。

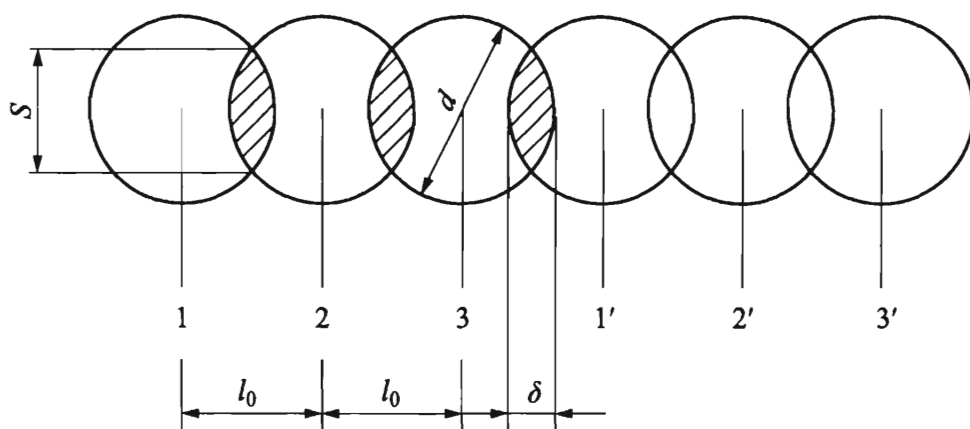


图 5-1 一次成墙搭接方式图

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：

$$S = \sqrt{d^2 - l_0^2} \quad (5-1)$$

δ 为单元墙桩间搭接长度，在施工深度小于 15m 时，支护挡墙 δ 不应小于 100mm、防渗墙 δ 不应小于 150mm；在施工深度 15m~20m 时， δ 不应小于 150mm；在施工深度大于 20m 时， δ 不应小于 200mm。

2 二次成墙搭接方式如图 5-2 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。 δ 为单元墙桩间搭接长度，在施工深度小于 10m 时， δ 不应小于 100mm。

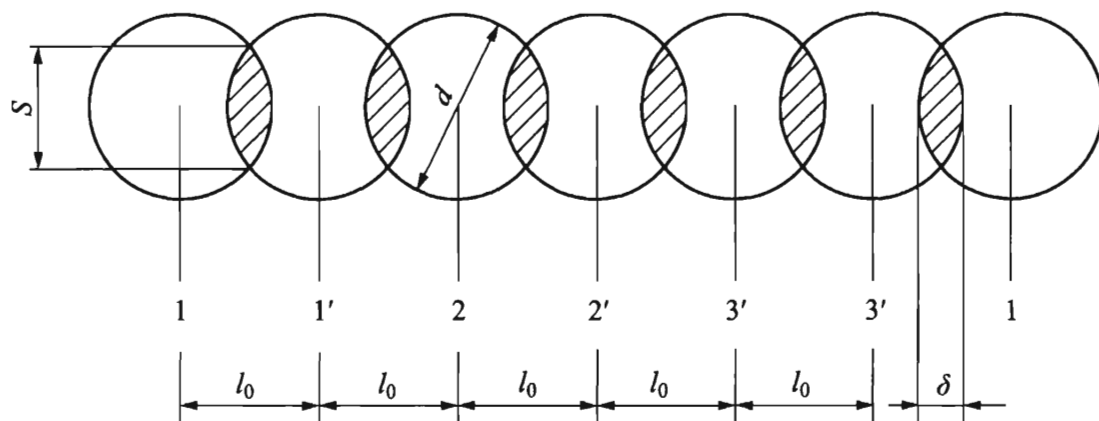


图 5-2 二次成墙搭接方式图

5.2.2 深层搅拌桩施工时，搅拌次数越多，则拌和越为均匀，水泥土平均强度也越高，但施工效率就降低。在复合地基处理时应适当提高搅拌次数。试验证明，当加固范围内土体任一点的水泥土经过 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：

$$N = \frac{h \cos \beta \Sigma Z}{V} n \quad (5-2)$$

式中： h ——搅拌叶片的宽度 (m)；

β ——搅拌叶片与搅拌轴的垂直夹角 ($^{\circ}$)；

ΣZ ——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)。

5.2.3 本条要求深层搅拌桩机所具备的功能是保证水泥土搅拌桩成桩（墙）质量的基本条件。

5.2.4 从设备能力评价水泥土成桩质量，主要有三个因素决定：搅拌次数、喷浆压力、喷浆量。目前使用的水泥土搅拌机的转速低，搅拌次数靠降低提升速度或复搅。喷浆压力、喷浆量两个因素，对成桩质量的影响有相关性，当喷浆压力一定时，喷浆量大

的成桩质量好；当喷浆量一定时，喷浆压力大的成桩质量好。为满足施工质量要求，水泥土搅拌机配备的注浆泵额定工作压力不宜小于 5.0MPa。注浆泵应保证其实际流量与搅拌桩机的喷浆钻进下沉或喷浆提升速度相匹配，使水泥掺量在水泥土桩中均匀分配；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。

5.2.5 针对干法施工，日本生产的 DJM 粉体喷射搅拌机械，空气压缩机容量为 $10.5\text{m}^3/\text{min}$ ，喷粉空气压缩机工作压力一般为 0.7MPa。为保证搅拌桩的施工质量及结合国内施工经验，空气压缩机喷粉压力值不宜小于 0.5MPa。

5.2.6 喷浆（粉）量是保证成桩质量的重要因素，必须进行有效测量。浆（粉）量供给能力是指储浆（灰）罐的储浆（灰）量与制浆机在一个单元墙一序施工时间内能够拌制浆（灰）量之和，数值应大于一个单元墙一序施工需要的浆（灰）量，通常取 20%~30% 的盈余量。

5.3 施 工 准 备

5.3.1 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人工凿除。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。

国产深层搅拌桩机的搅拌头大都采用双层（或多层）十字叶片形或螺旋叶片形。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，即使将搅拌头做了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，但施工效率却可大大提高。

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。

5.3.2 施工前应测量实际工作面高程，实际工作面高程与图纸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。

5.3.3 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，而水泥浆从注浆泵流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做实际标定。

5.3.4 每个场地开工前的成桩工艺试验必不可少，由于制桩喷灰量与土性、孔深、气流量等多种因素有关，故应根据设计要求逐步调试，确定施工有关参数（如土层的可钻性、提升速度等），以便正式施工时能顺利进行。施工经验表明送粉管路长度超过 60m 后，送粉阻力明显增大，送粉量也不易稳定。

5.3.5 水泥掺入量和水灰比

1 水泥掺入量。根据水泥掺入比确定水泥掺入量（ w ）。当水泥掺入比（ α_w ）确定后，水泥掺入量可按下式计算：

$$w = \alpha_w \times \gamma \quad (5-3)$$

式中： α_w ——水泥掺入比；

γ ——被加固土天然湿容重（ t/m^3 ）；

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，水泥掺入量高的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。《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 中规定水泥浆水灰比可选用 0.5~0.6，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，尤其在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 0.5~2.0（水：灰），其中复合地

基加固可取 0.5~1.0, 防渗工程和支护工程可取 0.8~2.0。一般来说, 黏土当含水量小于 30% 时, 水灰比不应小于 1.5, 当含水量大于 50% 时, 水灰比不应大于 0.8; 砂性土中视含水量而定, 应满足能充分搅拌搅和, 而且不漏浆。

5.3.6 外加剂和掺合料

在实际工程中, 较少采用外加剂, 若有特殊要求时, 可选用相应的外加剂。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加剂。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, 可以调节水泥凝结时间, 提高早期强度作用。石膏掺和量约为水泥用量的 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。木钙的掺和量为水泥用量的 0.2%。

5.4 工 艺 试 验

5.4.1 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, 因此在正式施工前, 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:

$$v = \frac{\gamma_d Q}{F \gamma \alpha_w (1 + \alpha_c)} \quad (5-4)$$

式中: v ——搅拌头喷浆提升速度 (m/min);

γ_d 、 γ ——分别为水泥浆和土的重度 (kN/m^3);

Q ——灰浆泵的排量 (m^3/min);

F ——搅拌桩的截面积 (m^2);

α_w ——水泥掺入比;

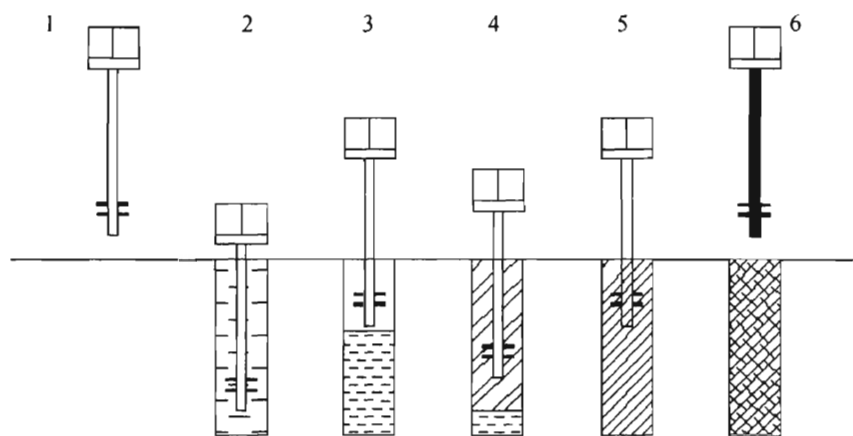
α_c ——水泥浆水灰比。

5.4.3 本条是对水泥土搅拌桩施工质量检验的要求。各施工机组应对成桩质量随时检查，及时发现问题，及时处理。开挖检查仅是浅部桩头部位，目测其成桩大致情况，例如成桩直径（墙厚）、搅拌均匀程度等。

5.5 施 工 作 业

5.5.1 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 5-3 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。



- 说明：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 5-3 浆喷搅拌桩施工流程图

1 桩机就位调平。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。

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~工序 5 共进行 3 次复搅，即可完成一根搅拌桩的作业。桩机移至另一桩位，施工另一根搅拌桩。

5.5.2 水泥土防渗墙施工：

水泥土防渗墙工序基本同 5.5.1 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 0.6m/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, 如流量仪等。
- 5) 输浆应有一定的压力, 一般输浆压力为 0.5MPa~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 5.5.1 工序 4 和工序 5 的工作。

5.5.3 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。

5.5.4 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。

5.5.6 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。

5.5.7 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 5.5.7 中 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 5.5.7 中 2) 处理；在黏土中，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 5.5.7 中 2) 处理。

5.5.9 制桩质量的优劣直接关系到地基处理的加固效果。其中的关键是注浆量、注浆与搅拌的均匀程度。因此，施工中应严格控制喷浆提升速度。

施工中要有专人负责制桩记录，对每根桩的编号、固化剂用量、成桩过程（下沉、喷浆提升和复搅等时间）进行详细的记录，质检员根据记录，对照标准施工工艺，对每根桩进行质量评定。喷浆量及搅拌深度的控制，直接影响成桩质量，采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录，可有效控制成桩质量。

6 施工质量控制

6.0.1 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。

6.0.2 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修补困难。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。

6.0.3 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。

6.0.5 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。

对搅拌深度和注浆流量进行自动记录，可最大程度降低人为干扰施工质量，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。搅拌设备所配备的监测计量仪器应经计量认证后方可使用。

6.0.6 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。

6.0.7 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。

6.0.8 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 6-1、图 6-2），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：

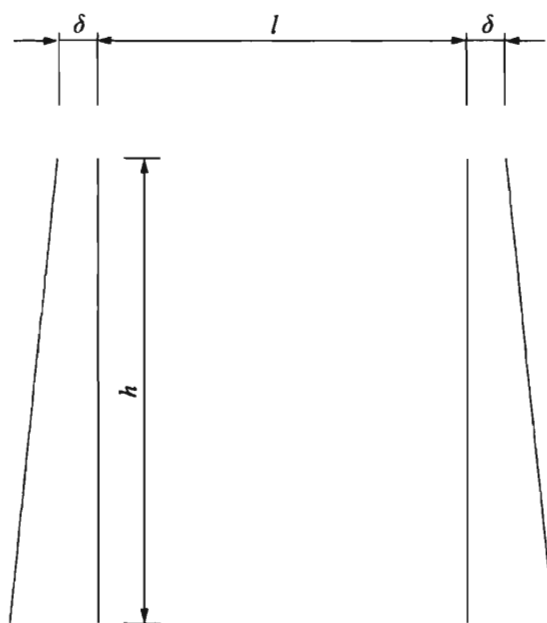


图 6-1 桩位立面图

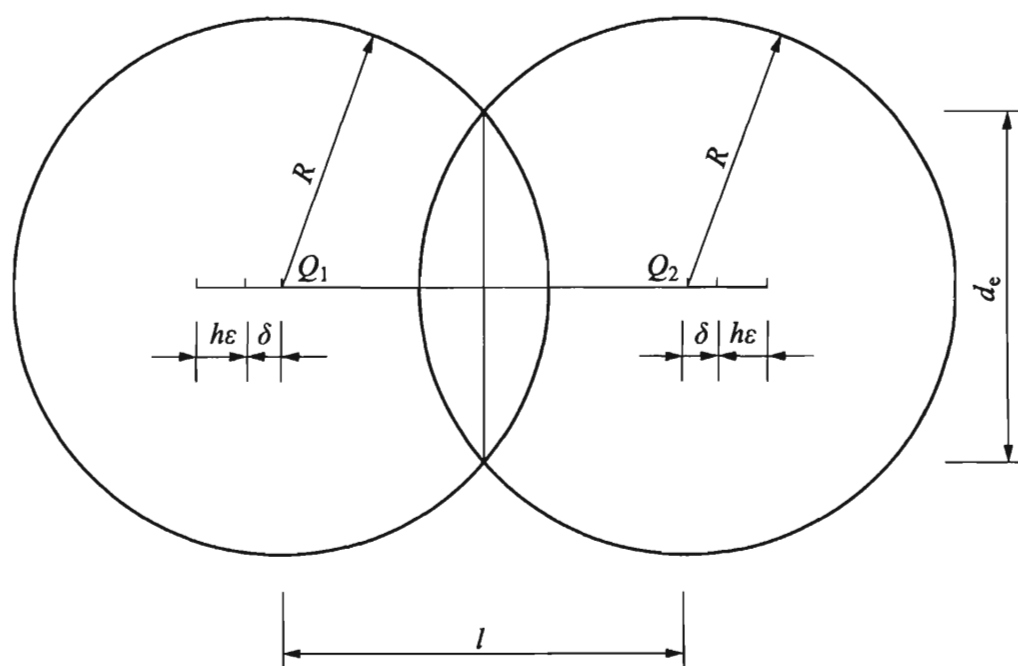


图 6-2 桩位平面图

$$d_e \geq 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{1}{2}l + \delta + h\varepsilon\right)^2} \quad (6-1)$$

式中： d_e ——有效墙厚（cm）；

R ——搅拌桩桩径（cm）；

- l ——桩间距 (cm);
 δ ——桩位偏差 (cm);
 h ——桩深 (cm);
 ε ——垂直度 (%).

6.0.9 低温施工对施工效率和施工质量都将产生不利影响。因此,按相关规范规定进入冬季施工时,需采取搅拌用水加热、搅拌站搭建暖棚、输浆管道包裹隔热装置、深层搅拌桩工作范围施工前进行翻土预热、施工后进行覆盖保温等加热、保温措施。

6.0.10 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,施工过程中应严格执行规定的施工工艺,控制水泥的掺入比、提升(下沉)速度、回转速度等是深层搅拌施工过程控制重要指标。

7 质 量 检 验

7.0.1 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，需采取补充处理措施以满足设计要求。

7.0.2 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，例如成桩直径、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。

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，不宜以此方法检测成果直接作为判断墙体质量的依据。

实践证明，在地下水土层环境中，黏土、淤泥质黏土形成的水泥土，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，载荷试验成桩 90d 后进行更为可靠和科学。考虑工程施工的连续性，载荷试验可根据水泥土凝固程度、桩间土恢复等具体情况在成桩 28d 后进行，如试验结果不能达到设计要求，载荷试验应在成桩 90d 后进行，并采用 90d 的检测结果作为试验的最终结论。

7.0.3 基槽开挖后，如发现桩位、桩数、桩径与桩体质量等不符合设计要求时，应采取有效的补充措施。

7.0.4~7.0.6 竣工质量检验标准和方法按“主控项目”和“一般项目”进行划分，根据竖向承载桩、防渗墙和支护挡墙的功能，对质量影响较大的项目设定为“主控项目”。

支护挡墙兼有防渗墙功能时，芯样也应进行渗透系数、允许比降等室内试验。

钻孔取芯检测宜在成桩后 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抗压强度才具有可比性。

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。

DL/T 5425—2018
代替 DL/T 5425—2009



中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 **最及时、最准确、最权威** 的电力标准信息



155198.1691

定价：36.00 元