

脱硫石膏土体增强剂应用技术规程

上海市建筑建材业市场管理总站

上海市建筑建材业市场管理总站

上海市工程建设规范

# 脱硫石膏土体增强剂 应用技术规程

Technical specification for application  
of desulpho-gypsum soil consolidator

DG/TJ08—2082—2011

J11830—2011

2011 上海

上海市工程建设规范

脱硫石膏土体增强剂  
应用技术规程

Technical specification for application  
of desulpho-gypsum soil consolidator

DG/TJ08—2082—2011

主编单位:上海市建筑科学研究院(集团)有限公司  
批准部门:上海市城乡建设和交通委员会  
施行日期:2011年5月1日

2011 上海

# 上海市城乡建设和交通委员会文件

沪建交[2011]169号

## 上海市城乡建设和交通委员会关于 批准《脱硫石膏土体增强剂应用技术规程》 为上海市工程建设规范的通知

各有关单位：

由上海市建筑科学研究院(集团)有限公司主编的《脱硫石膏土体增强剂应用技术规程》，经市建设交通委科技委技术审查和我委审核，现批准为上海市工程建设规范，统一编号为 DG/TJ08—2082—2011，自 2011 年 5 月 1 日起实施。

本规范由上海市城乡建设和交通委员会负责管理、上海市建筑科学研究院(集团)有限公司负责解释。

上海市城乡建设和交通委员会

二〇一一年二月二十八日

# 前 言

根据上海市城乡建设和交通委员会《关于印发〈2009年上海市工程建设规范和标准设计编制计划〉的通知》(沪建交〔2009〕1517号)的要求,规程编制组经调查研究,认真总结实践经验,参考国内外相关标准,并在广泛征求意见的基础上,制订本规程。

本规程对推动建设行业技术进步、合理利用工业固体废弃物资源和保护环境具有现实意义。

本规程的主要内容:1. 总则;2. 术语;3. 基本规定;4. 脱硫石膏土体增强剂的技术要求;5. 设计;6. 施工;7. 质量检验;附录。

各单位在执行本规程时,请将有关意见和建议反馈给上海市建筑科学研究院(集团)有限公司(地址:上海市宛平南路75号,邮编:200032),以供今后修订时参考。

本规程主编单位:上海市建筑科学研究院(集团)有限公司

参 编 单 位:同济大学

现代集团上海申元岩土工程有限公司

上海建研建材科技有限公司

上海宏顿地基工程公司

本规程主要起草人:李 阳 周 炜 叶观宝 陈国民

王吉望 袁聚云 陈海燕 赵立群

陈 刚

本规程主要审查人:许丽萍 诸葛培智 刘卫东 张易谦  
王培铭 李欢欢 王一如

上海市建筑建材业市场管理总站

二〇一一年二月二十一日

# Contents

1	General provisions .....	(1)
2	Terms .....	(2)
3	Basic requirements .....	(3)
4	Technical requirements of desulpho-gypsum soil consolidator .....	(4)
4.1	General provisions .....	(4)
4.2	Quality requirements .....	(4)
4.3	Inspection requirements .....	(6)
5	Design .....	(8)
5.1	General provisions .....	(8)
5.2	Laboratory test of mix proportion .....	(9)
5.3	Field test .....	(9)
5.4	Deep mixing .....	(10)
5.5	Jet grouting .....	(12)
6	Construction .....	(14)
6.1	General provisions .....	(14)
6.2	Process of test pile .....	(14)
6.3	Deep mixing .....	(15)
6.4	Jet grouting .....	(16)

7	Quality Inspection .....	(18)
7.1	General provisions .....	(18)
7.2	Deep mixing .....	(18)
7.3	Jet grouting .....	(19)
Appendix A	Determination of slurry fluidity .....	(20)
Appendix B	Determination of slurry bleeding rate .....	(21)
Appendix C	Determination of strength of reinforced soil .....	(23)
	Explanation of wording in this specification .....	(27)
	Normative standard .....	(28)
	Explanation of provisions .....	(29)

# 1 总 则

**1.0.1** 为了规范脱硫石膏土体增强剂的应用,做到技术先进、节约资源、保护环境、确保质量,特编制本规程。

**1.0.2** 本规程适用于脱硫石膏土体增强剂在本市地基处理工程中的设计、施工和质量检验。

**1.0.3** 脱硫石膏土体增强剂在应用时,除应符合本规程外,尚应符合国家和本市现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 脱硫石膏 desulpho-gypsum

是燃料燃烧后排放的含硫烟气,经石灰或石灰石进行湿法脱硫净化处理而产生的、以二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )为主要成分的一种石膏。

### 2.0.2 干法脱硫灰 desulfurized fly ash

采用炉内喷钙或循环流化床工艺对含硫烟气进行脱硫净化处理而产生的一种高钙高硫型的工业副产物。

### 2.0.3 脱硫石膏土体增强剂 desulpho-gypsum soil consolidator

采用脱硫石膏、水泥、活性混合材料和激发剂等原材料,按干燥、配比计量、混合或粉磨工艺生产而成的、用于地基处理的一种水硬性胶凝材料。

### 2.0.4 脱硫石膏土体增强剂加固土 soil reinforced by desulpho-gypsum soil consolidator

采用专业的施工设备,将脱硫石膏土体增强剂的浆液与各种土体强制拌合,经一定龄期养护后形成的具有一定强度的硬化体。

### 2.0.5 脱硫石膏加固土抗压强度比 strength ratio of desulpho-gypsum reinforced soil

对于工程现场所要加固的土,在试验方法相同、脱硫石膏土体增强剂和 32.5 级水泥两种胶凝材料掺量一致的条件下,脱硫石膏土体增强剂的室内加固土抗压强度与 32.5 级水泥的室内加固土抗压强度之比,以百分数表示。

根据养护龄期的不同,分脱硫石膏加固土 7d 抗压强度比和 28d 抗压强度比两种。

### 3 基本规定

- 3.0.1** 在脱硫石膏土体增强剂中,脱硫石膏的掺加量应为 10%~20%,脱硫石膏和干法脱硫灰的总掺加量不应高于 40%。
- 3.0.2** 脱硫石膏土体增强剂适用于流塑、软塑和可塑粘性土、粉土、粉砂、素填土等土体的加固处理。
- 3.0.3** 在加固处理有机质土、地下水流速大的土体时,脱硫石膏土体增强剂的掺量不应低于 25%。
- 3.0.4** 未经配比调整和试验验证,脱硫石膏土体增强剂不适用于硫酸盐离子含量大于 4000mg/kg、或氯盐离子大于 5000mg/kg、或 pH 值小于 5 的土体的加固处理。
- 3.0.5** 脱硫石膏加固土抗压强度比不应低于 200%。
- 3.0.6** 脱硫石膏土体增强剂宜采用深层搅拌法、高压喷射注浆法进行施工,也可用于将固化材料与土体强制搅拌的其它施工工艺。

## 4 脱硫石膏土体增强剂的技术要求

### 4.1 一般规定

4.1.1 脱硫石膏土体增强剂的技术性能必须符合本规程规定的物理力学性能指标的要求。

4.1.2 在以下情况下,应用单位宜对脱硫石膏土体增强剂的单个或全部施工性能指标进行检验:

- 1 在无工程经验的地区使用。
- 2 天然含水率大于 60%的土体加固处理。
- 3 有机质土的加固处理。
- 4 pH 值为适用范围界限值的土体加固处理。
- 5 早期强度要求高的地基加固工程。
- 6 应用单位认为必要。

### 4.2 质量要求

4.2.1 脱硫石膏土体增强剂的物理力学性能指标应符合表 4.2.1 的规定。

**表 4.2.1 脱硫石膏土体增强剂的物理力学性能指标**

项 目		指 标	测 试 方 法
密度, g/cm <sup>3</sup>		≥2.5	GB/T 208
抗压强度, MPa	7d	≥9.5	GB/T 17671
	28d	≥22.5	
抗折强度, MPa	7d	≥2.0	
	28d	≥4.5	
凝结时间, min	初凝	≥45	GB/T 1346
	终凝	≤600	
安定性(雷氏法), mm		≤5.0	GB/T 1346
细度(80μm 方孔筛筛余), %		≤10	GB/T 1345
比表面积, m <sup>2</sup> /kg		≥300	GB/T 8074

**4.2.2 脱硫石膏土体增强剂的施工性能指标应符合表 4.2.2 的规定。**

**表 4.2.2 脱硫石膏土体增强剂的施工性能指标**

项 目		指 标	测 试 方 法	
浆体流动度, mm	水灰比 0.55	≥100	本规程附录 A	
	水灰比 1.0	≥280		
浆体经时泌水率, %	水灰比 0.55	0.5h	≤5	本规程附录 B
		1h	≤10	
	水灰比 1.0	0.5h	≤25	
		1h	≤35	

续表 4.2.2

项	目	指 标	测 试 方 法
脱硫石膏加固土抗压强度比,%	7d	$\geq 200$	本规程附录 C
	28d	$\geq 200$	

### 4.3 验收要求

**4.3.1** 脱硫石膏土体增强剂的验收批量不宜超过 200t。

**4.3.2** 脱硫石膏土体增强剂进施工现场 11d 内,应有除 28d 强度以外的各项试验结果。28d 强度应在发货之日起 32d 内补报。报告内容还应包括:

- 1 用户名称;
- 2 生产厂名和地址;
- 3 试验报告编号及日期;
- 4 生产批号和数量;
- 5 检验结果。

**4.3.3** 应对产品包装和标识进行检验。包装袋应符合现行国家标准《水泥包装袋》(GB 9774)的有关规定。袋装产品每袋净重 50kg,不得少于标志质量的 98%。随机抽取 20 袋,总量不得少于 1000kg。包装袋上应标明产品名称、生产厂名和地址、净含量、保质期、生产日期、生产编号及执行标准号。散装产品应具备相同标志内容的卡片。

**4.3.4** 取样应按现行国家标准《水泥取样方法》(GB 12573)的规定进行。取样应有代表性,可连续取样,也可以在 20 个以上部位取等量样品,总量至少 20kg。试样应混合均匀,按四分法缩取出比试验所需量大一倍的试样。

**4.3.5** 应委托第三方机构,按批量复验脱硫石膏土体增强剂的技术性能。每批试样,应测定细度、安定性、抗压和抗折强度,并留样备查。

**4.3.6** 检验结果评定应符合下列规定:

1 符合表 4.2.1 要求的为合格品。若其中任何一项不符合要求,应从同一批产品中加倍取样,对全部项目进行复验,评定时以复验结果为准;

2 凡不符合表 4.2.1 要求的为不合格品。

## 5 设计

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 应进行室内配合比试验,确定脱硫石膏土体增强剂的掺量和水灰比。

**5.1.2** 宜进行现场试验,检验加固土桩的桩身强度和地基承载力。

**5.1.3** 对竖向承载的水泥土强度宜取 90d 龄期试块的立方体抗压强度平均值,对承受水平荷载的水泥土强度宜取 28d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

**5.1.4** 竖向承载搅拌桩或旋喷桩复合地基宜在基础和桩之间设置褥垫层。褥垫层厚度可取 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。

**5.1.5** 当搅拌桩或旋喷桩处理范围以下存在软弱下卧层时,应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)的有关规定进行下卧层承载力验算。

**5.1.6** 深层搅拌法形成的固化土加固体,可作为竖向承载的复合地基;基坑工程围护挡墙、被动区加固、防渗帷幕;大体积稳定土等。加固体形状可分为柱状、壁状、格栅状或块状等。

**5.1.7** 高压喷射注浆法可用于既有建筑和新建建筑地基加固,深基坑、地铁等工程的土层加固或防水。

## 5.2 室内配合比试验

5.2.1 应采用以下方法,确定脱硫石膏土体增强剂的水灰比:

1 取 32.5 级水泥,按水灰比为 0.55(深层搅拌法)或 1.0(高压旋喷注浆法),根据本规程附录 A 的试验方法,测定水泥净浆流动度  $L_c$ (mm);

2 取脱硫石膏土体增强剂,加入一定用水量,使得脱硫石膏土体增强剂净浆流动度  $L_D = L_c \pm 5$ (mm);

3 根据脱硫石膏土体增强剂的用量和用水量,计算出水灰比。

5.2.2 应采用以下方法,确定脱硫石膏土体增强剂的掺量:

1 按表 5.2.2,选取不少于 3 个掺量,根据本规程附录 C 的试验方法,进行室内加固土抗压强度试验。

表 5.2.2 脱硫石膏土体增强剂的掺量(%)

施工工艺 \ 土体天然含水率(%)	$\leq 60$	$>60, \leq 100$	$>100$
深层搅拌法	9~13	13~20	18~25
高压旋喷注浆法	13~18	18~25	22~30
备注	应采用本规程 5.2.1 确定的水灰比		

2 应根据加固土抗压强度设计值和室内配合比试验结果,确定脱硫石膏土体增强剂的掺量。

## 5.3 现场试验

5.3.1 应根据工程实际情况和室内配合比试验结果,制定现场试验方案。

**5.3.2** 宜根据工程实际情况,采用钻孔取芯、载荷试验、标准贯入等方法进行检验。

**5.3.3** 承重加固土桩应在成桩 28d 后,进行钻孔取芯和荷载试验:

1 对整根桩进行钻孔取芯,将整根桩等分成上、中、下三段,每段分别制作一组试件(每组三块),进行室内抗压强度试验。

2 按设计要求进行单桩、单桩复合地基或多桩复合地基静荷载试验。

**5.3.4** 支护、止水加固土桩应进行钻孔取芯试验,方法与承重加固土桩一致。

**5.3.5** 宜根据现场试验结果,进行深层搅拌法和高压喷射注浆法的设计。

## 5.4 深层搅拌法

**5.4.1** 置换率和长度应根据上部结构对承载力和变形的要求确定,并宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层;为提高抗滑稳定性而设置的搅拌桩,其桩长应超过危险滑弧以下 2m。

**5.4.2** 加固深度不宜大于 20m,桩径不应小于 500mm。

**5.4.3** 竖向承载搅拌桩的平面布置可根据上部结构特点及对地基承载力和变形的要求,采用柱状、壁状、格栅状或块状等加固型式。桩可只在基础平面范围内布置,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。

**5.4.4** 竖向承载加固土桩复合地基承载力设计值应通过现场单桩或多桩复合地基荷载试验确定。初步设计时,也可结合当地及土质相似工程的经验确定和式(5.4.4-1)估算。

$$f_{sp,d} = m \frac{P_u}{\gamma_R A_p} + \beta \cdot (1-m) \cdot f_{s,d} \quad (5.4.4-1)$$

式中  $f_{s,d}$ ——复合地基承载力设计值(kPa);

$m$ ——面积置换率;

$A_p$ ——桩的平均截面积( $m^2$ );

$f_{s,d}$ ——处理后桩间土承载力设计值(kPa),宜按经验取值,如无经验时,可取天然地基承载力设计值;

$\gamma_R$ ——承载力分项系数,取 2.0;

$\beta$ ——桩间土承载力折减系数,可根据试验确定;在无试验资料时,当桩端为软土时,可取 0.5~0.90;当桩端为硬土时,可取 0.1~0.4;基础和桩顶之间设置褥垫层时取高值。

$P_u$ ——单桩极限承载力标准值(kN);可通过现场载荷试验确定;也可按式(5.4.4-2)和式(5.4.4-3)估算,并取其中较小值:

$$P_u = \eta \cdot f_{cu} \cdot A_p \quad (5.4.4-2)$$

$$P_u = U_p \sum_{i=1}^n f_{si} \cdot l_i \quad (5.4.4-3)$$

式中  $P_u$ ——单桩极限承载力标准值(kN);

$f_{cu}$ ——与桩身加固土配方相同的室内加固土试块(边长为 70.7mm 的立方体)在标准养护条件下 90d 龄期的立方体抗压强度标准值(kPa);

$A_p$ ——桩的设计截面积( $m^2$ );

$\eta$ ——桩身强度折减系数,可取 0.50~0.66;

$U_p$ ——桩身截面周长(m);

$f_{si}$ ——桩周第  $i$  层土的平均极限摩阻力(kPa),对淤泥可取(10~16)kPa;对淤泥质土可取(16~24)kPa;对黏性土可取(24~30)kPa;

$l_i$ ——桩周第  $i$  层土的厚度(m)。

**5.4.5** 竖向承载搅拌桩处理地基的沉降计算主要包括复合地基加固区的沉降和加固区下卧层的沉降。以上两部分的沉降均应按现行上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08-11)有关规定执行,计算采用的附加应力从基础底面起算。加固深度范围内土层的压缩模量应通过现场试验确定。初步设计时也可按式(5.4.5)估算:

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (5.4.5)$$

式中  $E_{sp}$ ——复合土层的压缩模量(MPa);

$E_p$ ——桩的压缩模量(MPa),应通过载荷试验确定;无试验资料时可取桩身水泥石强度的100~200倍;

$E_s$ ——处理后桩间土的压缩模量(MPa),可近似取天然土的压缩模量。

## 5.5 高压喷射注浆法

**5.5.1** 竖向承载旋喷桩的平面布置可根据上部结构和基础特点确定。独立基础下的桩数一般不应少于4根。

**5.5.2** 加固深度不宜大于50m,桩径不应小于500mm。

**5.5.3** 竖向承载旋喷桩复合地基承载力设计值应通过现场单桩或多桩复合地基载荷试验确定。初步设计时也可按本规范公式(5.4.4-1)估算,公式中 $\beta$ 为桩间土承载力折减系数,可根据试验确定;在无试验资料时,可取 $\beta=0.2\sim 0.6$ ;当不考虑桩间土的作用时,取 $\beta=0$ ;基础和桩顶之间设置褥垫层时取高值。单桩极限承载力标准值估算时桩身强度折减系数 $\eta$ 取0.4~0.7。

**5.5.4** 桩长范围内复合土层以及下卧层地基变形值应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)有关规定计算,其中,复合土层的压缩模量可根据载荷试验或地区经验确定,初步

设计时也可按式(5.4.5)估算。

**5.5.5** 高压喷射注浆法用于深基坑、地铁等工程形成连续体时，相邻桩搭接不宜小于 300mm，并应符合设计要求和国家现行的有关规范的规定。

## 6 施 工

### 6.1 一般规定

- 6.1.1** 施工前应进行工艺性试桩,确定施工参数,试桩数量不得少于 2 根。
- 6.1.2** 施工时必须严格执行工艺性试桩中确定的施工参数,并如实做好各项记录。
- 6.1.3** 施工现场事先应予以平整,清除地上和地下的障碍物。遇有明浜、池塘及洼地时应抽水和清淤,回填粘性土料并予以压实,不得回填杂填土或生活垃圾。
- 6.1.4** 壁状加固时,相邻桩的施工时间间隔不应超过 12h。
- 6.1.5** 采用深层搅拌法,浆液必须在 0.5h 内连续泵送完。采用高压旋喷注浆法施工,浆液必须在 1h 内连续泵送完。在此期间应加强搅拌,防止离析和泌水。
- 6.1.6** 脱硫石膏土体增强剂袋装产品在施工现场储存时,应采取防雨、防潮措施,严禁与其它材料混堆混用。散装产品的筒仓应有明显标记。
- 6.1.7** 未经试验,脱硫石膏土体增强剂中不得掺加外加剂。

### 6.2 工艺性试桩

- 6.2.1** 应按表 6.2.1 控制并确定提升速度。

表 6.2.1 提升速度 (m/min)

成 桩 类 型 施 工 工 艺	承重加固土桩	支护、止水加固土桩
高压旋喷注浆法	0.05~0.25	0.05~0.10
深层搅拌法	≤0.50	

6.2.2 应调节并确定灰浆泵压力和喷浆量。整根桩的实际掺量不得低于设计值。

### 6.3 深层搅拌法

6.3.1 深层搅拌法施工主要步骤：

- 1 搅拌机械就位、调平。
- 2 预搅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 喷浆搅拌提升直至预定的停浆面。
- 6 关闭搅拌机械。

6.3.2 竖向承载搅拌桩施工时，停浆面应高于桩顶设计标高 300mm~500mm。在开挖基坑时，应将搅拌桩顶端施工质量较差的桩段用人工挖除。

6.3.3 施工中应保持搅拌桩机底盘的水平 and 导向架的垂直，搅拌桩的垂直偏差不得超过 1%，桩位的偏差不得大于 50mm，成桩直径和桩长不得小于设计值。

6.3.4 当水泥浆液到达出浆口后，应喷浆搅拌 30s，在水泥浆与桩端土充分搅拌后，再开始提升搅拌头。

6.3.5 搅拌机预搅下沉时不宜冲水，当遇到硬土层，下沉速度低

于 0.30m/min 时,方可适量冲水,但应考虑冲水对桩身强度的影响。

**6.3.6** 施工时如因故停浆,应将搅拌头下沉至停浆点以下 0.5m 处,待恢复供浆时再喷浆搅拌提升。若停机超过 3h,宜先拆卸输浆管路,并妥加清洗。

## **6.4 高压喷射注浆法**

**6.4.1** 高压喷射注浆法施工主要步骤:

- 1 机具就位。
- 2 贯入喷射管。
- 3 喷射注浆。
- 4 拔管和冲洗。

**6.4.2** 施工前应根据现场环境和地下埋设物位置等情况,复核高压喷射注浆的设计孔位。

**6.4.3** 单管法及双管法的高压水泥浆液流和三管法高压水射流的压力应大于 20MPa。

**6.4.4** 喷射孔与高压注浆泵的距离不宜大于 50m,钻孔的位置与设计位置的偏差不得大于 50mm。实际孔位、孔深和每个钻孔内的地下障碍物、洞穴、涌水、漏水及与岩土工程勘察报告不符等情况均应详细记录。

**6.4.5** 当喷射注浆管贯入土中,喷嘴达到设计标高时,即可喷射注浆。在喷浆量参数达到规定值后,随即分别按旋喷、定喷或摆喷的工艺要求,提升喷射管,由下而上喷射注浆。喷射管分段提升的搭接长度不得小于 100mm。

**6.4.6** 对需要局部扩大加固范围或提高强度的部位,可采用复喷措施。

**6.4.7** 在高压喷射注浆过程中出现压力骤然下降、上升或冒浆异常时,应查明原因并及时采取措施。

**6.4.8** 高压喷射注浆完毕,应迅速拔出喷射管。为防止浆液凝固收缩影响桩顶高程,必要时可在原孔位采用冒浆回灌或二次注浆等措施。

**6.4.9** 施工中应及时将泥浆运出或在现场短期堆放后作土方运出。

## 7 质量检验

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 可根据工程要求和施工经验采用开挖检查、钻孔取芯、标准贯入、载荷试验等方法进行检验,并结合工程测试、观测资料及实际效果综合评价加固效果。

**7.1.2** 检验点应布置在下列部位:

- 1 有代表性的桩位;
- 2 施工过程中出现异常情况的部位;
- 3 地基情况复杂,可能对施工质量产生影响的部位。

### 7.2 深层搅拌法

**7.2.1** 深层搅拌桩的施工质量检验可采用以下方法:

1 成桩 7d 后,采用浅部开挖桩头(深度宜超过停浆(灰)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%;

2 成桩 28d 后,用双管单动取样器钻取芯样作抗压强度检验、桩身标准贯入检验,检验数量为施工总桩数的 2%,且不少于 3 根;

3 成桩 28d 后,可用单桩载荷试验进行检验,检验数量为施工总桩数的 1%,且不少于 3 根。

**7.2.2** 竖向承载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。载荷试验必须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

每项单体工程不应少于 3 点。

**7.2.3** 对相邻桩搭接要求严格的工程,应在成桩 15d 后,选取数根桩进行开挖,检查搭接情况。

**7.2.4** 基槽开挖后,应检验桩位、桩数与桩顶质量,如不符合设计要求,应采取有效补强措施。

### **7.3 高压喷射注浆法**

**7.3.1** 高压喷射注浆施工质量可采用开挖检查、钻孔取芯、标准贯入、载荷试验或局部开挖注水试验等方法进行检验,并结合工程测试、观测资料及实际效果综合评价加固效果。

**7.3.2** 质量检验点的数量应为施工孔数的 1%~2%,并不应少于 3 点,不合格者应进行补喷。

**7.3.3** 质量检验应在高压喷射注浆结束 28d 后进行。

**7.3.4** 竖向承载旋喷桩地基竣工验收时,承载力检验应采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验。检验数量为桩总数的 0.5%~1%,且每项单体工程不应少于 3 点。

## 附录 A 浆体流动度的测定

**A. 0. 1** 本附录规定了浆体流动度的测定方法。

**A. 0. 2** 试验应采用以下仪器：

- 1 水泥净浆搅拌机；
- 2 截锥圆模：上口直径 36mm，下口直径 60mm，高度为 60mm，内壁光滑无缝的金属制品；
- 3 玻璃板；400mm×400mm×5mm；
- 4 秒表；
- 5 钢直尺；300mm；
- 6 刮刀；
- 7 药物天平：称量 1000g，分度值 1g。

**A. 0. 3** 试验应按以下步骤进行：

1 将玻璃板放置在水平位置，用湿布擦抹玻璃、截锥圆模、搅拌器及搅拌锅，使其表面湿而不带水渍。将截锥圆模放在玻璃板的中央，并用湿布覆盖待用。

2 称取水泥(或脱硫石膏土体增强剂)300g 倒入搅拌锅内，加入 165g 水或 300g 水搅拌。

3 将拌好的浆体迅速注入截锥圆模内，用刮刀刮平，将截锥圆模按垂直方向提起，同时开启秒表计时，任浆体在玻璃板上流动，至 30s，用直尺量取流淌部分相互垂直的两个方向的最大直径，取平均值作为浆体流动度。

**A. 0. 4** 计算结果精确至 1mm。

## 附录 B 浆体经时泌水率的测定

**B. 0. 1** 本附录规定了浆体经时泌水率的测定方法。

**B. 0. 2** 泌水试验所用的仪器设备应符合下列条件：

- 1 试样筒：采用容积为 1L 的容量筒；
- 2 台秤：称量为 50kg，感量为 50g；
- 3 量筒：容量为 10mL、50mL、100mL 的量筒及吸管；

**B. 0. 3** 泌水试验应按下列步骤进行：

1 应用湿布湿润试样筒内壁后立即称量，记录试样筒的质量。再将脱硫石膏土体增强剂（或水泥）浆料试样分两层装入试样筒，每一层用橡皮锤轻轻沿容量外壁敲打 5 次～10 次，进行振实，直至拌合物表面不见大气泡为止；并使浆料表面低于试样筒筒口 $(30\pm 3)$ mm，用抹刀抹平。抹平后立即计时并称量，记录试样筒与试样的总质量。

2 在以下吸取混凝土拌合物表面泌水的整个过程中，应使试样筒保持水平、不受振动；除了吸水操作外，应始终盖好盖子；室温应保持在 $(20\pm 2)$ ℃。

3 从计时开始后 60min 内，每隔 10min 吸取 1 次试样表面渗出的水。为便于吸水，每次吸水前 2min，将一片 35mm 厚的垫块垫入筒底一侧使其倾斜，吸水后平稳地复原。吸出的水放入量筒中，记录每次吸水的量并计算累计水量，精确至 1mL。

**B. 0. 4** 泌水率应按下列式计算：

$$B = \frac{V_w}{G_w} \times (1 + 1/\mu) \times 100 \quad (\text{A. 0. 4-1})$$

$$G_w = G_1 - G_0 \quad (\text{A. 0. 4-2})$$

式中  $B$  —— 泌水率(%)；  
 $V_w$  —— 规定时间内的泌水总量(mL)；  
 $G_w$  —— 浆料试样质量(g)；  
 $\mu$  —— 水灰比；  
 $G_1$  —— 试样筒及试样总质量(g)；  
 $G_0$  —— 试样筒质量(g)。

计算应精确至 1%。泌水率取三个试样测值的平均值。三个测值中的最大值或最小值,如果有一个与中间值之差超过中间值的 15%,则以中间值为试验结果;如果最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%时,则此次试验无效。

## 附录 C 室内加固土抗压强度试验

**C.0.1** 本试验适用于测定加固土立方体试件的抗压强度试验,以检验脱硫石膏土体增强剂的质量,并确定和校核加固土配合比,为深层搅拌法和高压旋喷注浆法的设计和施工提供依据。

**C.0.2** 材料选用应满足下列要求:

1 所用土料应是工程现场所要加固的土。土料从现场采取后,运回试验室,风干、碾碎,过 5mm 筛子以备用;

2 水泥应为符合《通用硅酸盐水泥》(GB/T 175)要求的 32.5 级水泥。

3 所用的脱硫石膏土体增强剂(或水泥)应是施工现场所使用的新鲜材料。脱硫石膏土体增强剂(或水泥)不应超过出厂期三个月,并应在试验室重新测定其抗压强度和抗折强度,满足要求时才可使用,

4 所用水采用一般的自来水。

**C.0.3** 采用 70.7mm×70.7mm×70.7mm 立方体试模,试模应具有足够的刚度并便于拆装。试模内表面应光滑,其平整度误差不得超过边长的 0.05%,边长的误差不得超过边长的 1/150,相邻面垂直度误差不得超过±0.5°。

**C.0.4** 试件可在振动台上振实,振动台应符合《混凝土试验用振动台》(JG/T 3020)中技术要求的规定。

在没有振动台的条件下,也可以采用人工捣实,捣棒应采用钢质材料制成,直径 100mm,长 350mm,一端应为弹头形。

**C.0.5** 脱硫石膏土体增强剂(或水泥)的掺量可按式确定:

$$W_c = \frac{1+w}{1+w_0} a_w \cdot W_0 \quad (\text{C.0.5-1})$$

加水量可按下式确定：

$$W_w = \left( \frac{w - w_0}{1 + w} + \mu a_w \right) \frac{1 + w}{1 + w_0} W_0 \quad (\text{C. 0. 5-2})$$

式中  $W_0$ ——风干土的质量(kg)；

$W_c$ ——脱硫石膏土体增强剂(或水泥)的质量(kg)；

$W_w$ ——水的质量(kg)；

$w$ ——土的天然含水量(%)；

$w_0$ ——烘干土的含水量(%)；

$a_w$ ——脱硫石膏土体增强剂(或水泥)的掺量(%)；

$\mu$ ——水灰比,根据施工工艺取值,深层搅拌法一般取 0.55,高压旋喷注浆法一般取 1.0。

#### C. 0. 6 试件成型和养护应满足下列要求：

1 制作试件前,将试模组装牢固,并清刷干净,在其内壁涂一层脱模剂；

2 根据配方分别称量风干土、脱硫石膏土体增强剂(或水泥)和水；

3 将风干土和脱硫石膏土体增强剂(或水泥)放在砂浆搅拌机拌合 1min,然后将拌合水一次倒入,从加水起拌和 10min

4 采用振动台成型时,可先在试模内装入一半加固土拌合物,在振动台上振动 1min,紧接着装入其余拌合物,并稍有富裕,在振动台上振动 1min。振动时应防止试模在振动台上自由跳动。

采用人工捣实成型时,加固土拌合物应分两层装入试模,每层的装料厚度大致相同。每层插捣时按螺旋方向从边缘向中心进行,同时将试模进行左右前后摇动,直至面上没有气泡出现为止。

插捣时捣棒须保持垂直,不得倾斜。并用抹刀沿试模内壁插

人数下,以防止产生麻面。捣棒应每层插捣 25 次。插捣底层时,捣棒应达到试模底面;插捣上层时,捣棒应穿入下层深度约 10mm;

5 振捣或插捣完毕后,刮除试模顶部多余的加固土,并抹平表面,盖上塑料布防止水分蒸发,并放入标准养护室;

6 试件成型后,根据加固土的强度决定拆模时间,一般 3d 后可编号拆模,拆模后称每一试块重量,然后将试块浸入水中,进行标准水中养护。养护水温度应控制在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 内;

**C.0.7** 采用的压力试验机,其示值的相对误差不应大于 2%,量程应能使试件的预计破坏荷载不小于全量程的 20%,也不大于全量程的 80%。

**C.0.8** 抗压试验按以下步骤进行:

1 试件从养护室内取出后应及时进行试验。

2 试件在试压前应将试块表面刷净擦干并称其重量。

3 把试件放在试验机下压板中心,试件的承压面应与成型时的顶面垂直。开动试验机,当上压板与试件接近时,调整球座,使接触均衡。

4 以 $(10\sim 15)\text{N/s}$ 的速度连续而均匀地加荷。当试件接近破坏而开始迅速变形时,应停止调整试验机油门,直至试件破坏,并记录破坏荷载。

**C.0.9** 加固土抗压强度按式(C.0.9)计算:

$$f_{\text{cu}} = \frac{P}{A} \quad (\text{C.0.9})$$

式中  $f_{\text{cu}}$ —— 试验龄期下加固土抗压强度,MPa;

$P$  —— 破坏荷载,N;

$A$  —— 试件的承压面积, $\text{mm}^2$ 。

**C. 0. 10** 取三个试件测值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。当单个试件的测值与平均值之差超过平均值的±15%时,该试件的测值应剔除,按余下两个试件的测值计算平均值。剔除后如一组试件不足两个,则该组计算结果无效,须重做。

**C. 0. 11** 脱硫石膏 7d 加固土抗压强度比按式(C. 0. 11)计算:

$$K_7 = \frac{f_{\text{cuD}7}}{f_{\text{cu}7}} \times 100 \quad (\text{C. 0. 11})$$

式中  $K_7$ —— 脱硫石膏加固土 7d 抗压强度比(%),计算结果精确至 1%;

$f_{\text{cuD}7}$ —— 脱硫石膏土体增强剂加固土 7d 抗压强度(MPa);

$f_{\text{cu}7}$ —— 水泥土 7d 抗压强度(MPa)。

**C. 0. 12** 脱硫石膏 28d 加固土抗压强度比按式(C. 0. 12)计算:

$$K_{28} = \frac{f_{\text{cuD}28}}{f_{\text{cu}28}} \times 100 \quad (\text{C. 0. 12})$$

式中  $K_{28}$ —— 脱硫石膏加固土 28d 抗压强度比(%),计算结果精确至 1%;

$f_{\text{cuD}28}$ —— 脱硫石膏土体增强剂加固土 28d 抗压强度(MPa);

$f_{\text{cu}28}$ —— 水泥土 28d 抗压强度(MPa)。

## 本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,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 规程中指定应按其他有关标准、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

- 1.《通用硅酸盐水泥》GB/T 175
- 2.《水泥密度测定方法》GB/T 208
- 3.《水泥细度检验方法 筛析法》GB/T 1345
- 4.《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T 1346
- 5.《水泥比表面积测定方法 勃氏法》GB/T 8074
- 6.《水泥包装袋》GB 9774
- 7.《水泥取样方法》GB 12573
- 8.《水泥胶砂强度检验方法(ISO)法》GB/T 17671
- 9.《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 10.《混凝土试验用振动台》JG/T 3020

上海市工程建设规范

脱硫石膏土体增强剂  
应用技术规程

DG/TJ08—2082—2011

条文说明

2011 上海



# Contents

1	General provisions .....	(31)
2	Terms .....	(32)
3	Basic requirements .....	(33)
4	Technical requirements of desulpho-gypsum soil consolidator .....	(36)
4.1	General provisions .....	(36)
4.2	Quality requirements .....	(37)
4.3	Inspection requirements .....	(41)
5	Design .....	(42)
5.1	General provisions .....	(42)
5.2	Laboratory test of mix proportion .....	(45)
5.3	Field test .....	(49)
5.4	Deep mixing .....	(49)
5.5	Jet grouting .....	(49)
6	Construction .....	(50)
6.1	General provisions .....	(50)
6.2	Process of test pile .....	(50)
6.3	Deep mixing .....	(51)
6.4	Jet grouting .....	(51)
7	Quality Inspection .....	(52)
Appendix A	Determination of slurry fluidity .....	(53)
Appendix B	Determination of slurry bleeding rate .....	(54)
Appendix C	Determination of strength of reinforced soil .....	(55)



# 1 总 则

**1.0.1** 上海市脱硫石膏的年排放量约为 150 万吨,干法脱硫灰约为 25 万吨。目前脱硫石膏主要用于水泥行业和石膏板厂,每年利用量仅为 70 万吨~80 万吨,其利用和处置面临严峻形势。并且干法脱硫灰为高钙高硫型的灰渣,综合利用的难度更大。因此,为充分利用上海市的脱硫石膏和干法脱硫灰,在前期科研和工程应用的基础上,对本市工业固废材料、生产配比和生产工艺又进一步开展了适应性研究。目前脱硫石膏土体增强剂尚未形成相当的工程应用规模。因此,迫切需要编制应用技术规程,以利于在地基处理加固工程中安全合理地使用脱硫石膏,提高工程质量。

## 2 术 语

**2.0.1~2.0.2** 根据烟气脱硫工艺的不同,本市电厂排放的脱硫废渣包括脱硫石膏和干法脱硫灰两大类。其中脱硫石膏的主要成分是二水硫酸钙;而干法脱硫灰成分较复杂,主要由两部分组成:一部分是粉煤灰相,另一部分是脱硫相(包括脱硫产物和未消耗掉的吸收剂)。干法脱硫灰的成分具有高钙高硫的特征。

**2.0.3** 研究成果表明,单纯采用脱硫石膏等量或超量代替水泥,加固土的强度将会降低。应在水泥中掺加活性混合材料和激发剂,充分发挥脱硫石膏的硫酸盐激发作用和干法脱硫灰的潜在活性,复配成土体固化材料,才能提高加固土的强度。为了便于应用,脱硫石膏土体增强剂在生产时,将脱硫石膏、干法脱硫灰和其它材料混合或粉磨而成,可拌制浆液,直接用于深层搅拌桩和高压旋喷注浆法施工。施工时不用再添加外加剂。

试验证明,干法脱硫灰具有火山灰活性,宜作为一种活性混合材料,用于脱硫石膏土体增强剂,可提高脱硫废弃物的利用比例。

**2.0.5** 由于脱硫石膏土体增强剂掺加了较多量的脱硫石膏、干法脱硫灰和其它工业固废活性混合材料,因此,按水泥胶砂试验方法来检测,脱硫石膏土体增强剂的抗压强度、抗折强度均较低。但是,脱硫石膏土体增强剂是一种适用于土体加固处理的水硬性胶凝材料,其加固土强度要远远高于水泥土的强度。所以,为体现本规程的技术先进性,本规程引入了“脱硫石膏加固土抗压强度比”这一术语。

由于地基处理一般采用强度等级为 32.5 的水泥进行施工,因此,本规程将强度等级为 32.5 的水泥的加固土作为对比样。

### 3 基本规定

**3.0.1** 脱硫石膏自身不会产生提高土体强度的水化产物,脱硫石膏主要起硫酸盐激发作用。脱硫石膏的掺量过高,会降低其它活性混合材的掺量,从而降低了加固土的强度。试验和工程实践表明,脱硫石膏的掺加量在 10%~20%的范围内为宜。当土体的天然含水率较低时,取下限为宜;当土体的天然含水率较高时,取上限为宜。

干法脱硫灰具有火山灰活性,但是,干法脱硫灰的掺量过高,也会对加固土强度造成影响。根据 15 组室内加固土的试验结果,脱硫石膏与干法脱硫灰的总掺加量对与强度的关系见表 3.0.1。

**表 3.0.1 脱硫石膏与干法脱硫灰的总掺加量与强度的关系**

加固土抗压强度(MPa)		脱硫石膏与干法脱硫灰的总掺加量(%)		
		20~30	30~40	40~50
7d	最大	5.0184	3.368	3.103
	最小	4.021	2.678	2.137
	平均	4.575	3.207	2.608
28d	最大	6.135	4.928	4.501
	最小	5.102	4.181	3.133
	平均	5.774	4.564	3.706

注:1. 试验主要参数:水泥、脱硫石膏土体增强剂的掺量均为 19%,水灰比均为 1.0,淤泥质粘土天然含水率 45%;  
2. 水泥土强度:7d 为 0.922MPa,28d 为 1.152MPa。

由表 3.0.1 可知,脱硫石膏与干法脱硫灰的总掺加量逐步提高,对加固土的强度影响较大。对比水泥土的强度,本规范规定“脱硫石膏和干法脱硫灰的总掺加量应不高于 40%”。

**3.0.2** 根据科研成果、检测数据和工程实践,脱硫石膏土体增强剂的适用范围较广,适用于流塑、软塑和可塑粘性土、粉土、粉砂、素填土等土体的加固处理。在绝大多数的工程条件下,脱硫石膏土体增强剂加固土的强度均明显高于水泥土的强度。特别是在加固高含水量的土体时(如淤泥和淤泥质粘土),脱硫石膏土体增强剂的技术优势更明显。而在加固处理低含水量的土体,或粘粒含量较低的粉砂,脱硫石膏土体增强剂的技术优势相对较弱。

**3.0.3** 工程实践表明,在处理有机质土时,应大幅度提高脱硫石膏土体增强剂的掺量。例如,在江西衡茶吉铁路地基处理工程中,土体的有机质含量高达 13%,天然含水量高达 70%,施工单位采用脱硫石膏土体增强剂进行搅拌桩施工,经现场试验,脱硫石膏土体增强剂的掺量达 40%时,取芯强度超过 1.5MPa,满足设计要求(1.0MPa)。

在处理地下水流速大的土体时,也应提高脱硫石膏土体增强剂的掺量。例如,在舟山中远船务工程有限公司码头护岸工程中,紧临海岸进行旋喷桩,地下水流速很高。该工程脱硫石膏土体增强剂的掺量达 25%。宁波冶金勘察设计研究股份有限公司的钻孔取芯试验于 2009 年 3 月 25 日开始并于 30 日结束,共抽检试桩 11 枚,取芯深度为 0.90m~1.55m、7.00m~8.05m、14.5m~15.0m 三段,共取出有效芯样 33 块。在 33 块芯样的抗压强度结果中,最大值 1.77MPa,最小值 1.46MPa,平均值符合设计要求。

值得注意的是,在砂性土、粉砂的土体条件下,由于土体的渗

透系数大,如果地下水流速高,地基加固材料易流失。因此,在这种土体渗透系数大、地下水流速高的工程环境,必须通过现场试验,确定加固方案。

**3.0.4** 根据工程实验,在硫酸盐和氯盐侵蚀环境中的土体以及pH值小于5的酸性土体中,搅拌桩的质量明显下降;行业标准《混凝土拌和用水标准》(JGJ63-2006)提出可用于素混凝土的水的标准为硫酸盐离子 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量小于等于2700mg/L,氯盐离子 $\text{Cl}^-$ 小于等于3500mg/L。

根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021),水腐蚀介质数据乘以1.5的系数为土的腐蚀指标,单位以mg/(kg土)表示,故规定“不适用于硫酸盐离子含量大于4000mg/kg、或氯盐离子大于5000mg/kg”。

由于脱硫石膏土体增强剂的工业固体废弃物的掺量较高,而水泥的掺量较低,因此,加固土液相的碱度较低(pH=7~9)。但是,如果在pH值小于5的土体,由于加固土液相的碱度引起变化,会影响到水化产物的正常生成,故本规范规定“脱硫石膏土体增强剂不适用于pH值小于5的土体的加固处理。”

**3.0.5** 为体现本规范的先进性,规定“脱硫石膏加固土抗压强度比不应低于200%。”

**3.0.6** 由于脱硫石膏土体增强剂与土体强制搅拌后,与土体发生一系列物理化学反应,使得加固土获得较高的强度。而对于不与土体搅拌、混合的施工方法,如压密注浆,尽管脱硫石膏土体增强剂也产生一些水化产物,具有一定强度,但不能获得明显高于水泥的使用效果,因此脱硫石膏土体增强剂宜采用深层搅拌法、高压喷射注浆法或其它固化材料与土体强制搅拌的施工工艺进行施工。

## 4 脱硫石膏土体增强剂的技术要求

### 4.1 一般规定

**4.1.1、4.1.2** 脱硫石膏土体增强剂的技术性能指标包括物理力学指标和施工性能指标,其中物理力学指标是必须满足的,而施工性能技术指标是选择性指标,可根据工程实际情况进行检验。

**4.1.2** 在一些特殊恶劣的工程环境下,例如无工程经验的地区、天然含水率大于 60% 的土体加固处理、有机质土的加固处理、pH 值为适用范围界限值的土体加固处理,往往影响加固土的强度形成。因此,应进行脱硫石膏土体增强剂的施工性能检验,验证其适用性。

同济大学的检测结果和一些工程经验表明,脱硫石膏土体增强剂加固土的早期强度较高,龄期为 7 天的脱硫石膏土体增强剂的无侧限抗压强度基本达到甚至超过 90 天的普通水泥加固土的无侧限抗压强度,满足一些早期强度要求较高的工程的要求。例如,本市骏丰国际财富广场地处大连路、四平路交汇处,为地下二层结构。由于该工程所处的地质条件较差,地下淤泥质粘土的天然含水量高达 60%~70%,因此,在地下基础施工中,围护结构出现安全隐患。上海基础公司使用了脱硫石膏土体增强剂,采用旋喷桩施工工艺(掺量 25%,个别桩位掺量 30%),进行围护结构工程抢险,效果良好,使该工程顺利度过开挖危险期。脱硫石膏土体增强剂在该工程的应用数量达 3000 吨,旋喷桩加固土体 7000 立方米。经检测,旋喷桩的 7d 桩身强度超过 1.0MPa,28d 桩身强度超过 2.0MPa,完全满足设计要求。

## 4.2 质量要求

4.2.1 脱硫石膏土体增强剂的物理力学性能指标分析如下:

1 密度:由于脱硫石膏的密度较小( $1.0\text{g}/\text{cm}^3\sim 1.1\text{g}/\text{cm}^3$ ),脱硫石膏土体增强剂中脱硫石膏的掺量为 $10\%\sim 20\%$ ,故脱硫石膏土体增强剂密度较小。

2 凝结时间、安定性(雷氏法):脱硫石膏土体增强剂属水性胶凝材料,故采用《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346)的方法,检测其凝结时间和安定性。

3 细度( $80\mu\text{m}$ 方孔筛筛余)、比表面积:为了充分发挥脱硫石膏土体增强剂中各种胶凝材料的潜在活性,需控制其细度。用 $80\mu\text{m}$ 方孔筛筛余、比表面积两项指标来表示。

4 抗压强度和抗折强度:由于各种粘土和淤泥的土性、天然含水率差异较大,固化材料的掺量各不相同,因此,难以采用水泥土无侧限抗压强度值作为脱硫石膏土体增强剂的质量标准指标。故以水泥胶砂强度值作为控制指标。

5 将脱硫石膏土体增强剂(其中脱硫石膏掺加量 $18\%$ ,干法脱硫灰掺加量 $12\%$ )送上海市建筑科学研究院检测站进行检测,脱硫石膏土体增强剂的物理力学指标检测结果见表4.2.1。

**表 4.2.1 脱硫石膏土体增强剂的物理力学性能指标**

项	目	物理指标	检验结果
密度, g/cm <sup>3</sup>		≥2.5	2.70
抗压强度, MPa	7d	≥9.5	14.4
	28d	≥22.5	22.5
抗折强度, MPa	7d	≥2.0	3.7
	28d	≥4.5	5.9
凝结时间, min	初凝	≥45	345
	终凝	≤600	455
安定性(雷氏法), mm		≤5.0	1.5
细度(80μm 方孔筛筛余), %		≤10	6
比表面积, m <sup>2</sup> /kg		≥300	320

**4.2.2 脱硫石膏土体增强剂的施工性能指标分析如下：**

**1 浆体流动度和浆体经时泌水率**

提出浆体流动度指标,是为了保证在一定水灰比条件下,脱硫石膏土体增强剂浆体达到良好的流动性,易于泵送。如果流动性差,在施工现场需提高用水量,这样会降低加固土的强度。

提出浆体经时泌水率指标,是为了控制浆体在灰浆池内短暂储存期内的泌水,保证桩体的实际掺量。

将脱硫石膏土体增强剂(其中脱硫石膏掺加量 18%,干法脱硫灰掺加量 12%)送上海市建筑科学研究院进行检测,脱硫石膏土体增强剂和水泥的浆体流动度和浆体泌水率检验结果分别见表 4.2.2-1 和表 4.2.2-2。

表 4.2.2—1 脱硫石膏土体增强剂的浆体流动度和浆体泌水率

项	目		指 标	检 测 结 果
浆体流动度,mm	水灰比 0.55		$\geq 100$	129
	水灰比 1.0		$\geq 280$	299
浆体泌水率,%	水灰比 0.55	0.5h	$\leq 5$	2
		1h	$\leq 10$	5
	水灰比 1.0	0.5h	$\leq 25$	21
		1h	$\leq 35$	29

表 4.2.2—2 水泥的浆体流动度和浆体泌水率

项	目		指 标	检 测 结 果
浆体流动度,mm	水灰比 0.55		$\geq 100$	124
	水灰比 1.0		$\geq 280$	300
浆体泌水率,%	水灰比 0.55	0.5h	$\leq 5$	1.3
		1h	$\leq 10$	3
	水灰比 1.0	0.5h	$\leq 25$	12
		1h	$\leq 35$	17

对比水泥和脱硫石膏土体增强剂的施工性能指标可知,脱硫石膏土体增强剂和水泥的浆体流动度基本一致;在低水灰比条件下(0.55),浆体泌水率的差别不大。但是,在高水灰比条件下(1.0),脱硫石膏土体增强剂的浆体泌水率要明显高于水泥,这是由于活性混合材的掺量过高的原因造成的。因此,在施工要注意拌制好的浆液要在规定时间内及时泵送,并加强灰浆池的搅拌,

防止泌水。

## 2 脱硫石膏加固土抗压强度比指标

将脱硫石膏土体增强剂(其中脱硫石膏掺加量 18%,干法脱硫灰掺加量 12%)、水泥送上海市建筑科学研究院检测站进行检测,脱硫石膏土体增强剂的加固土抗压强度比检测结果见表 4.2.2—3。

表 4.2.2—3 脱硫石膏土体增强剂的加固土抗压强度比

项 目		加固土抗压强度比	检验结果
脱硫石膏土体增强剂加固土抗压强度,MPa	7d	—	2.87
	28d	—	5.22
水泥加固土抗压强度,MPa	7d	—	1.16
	28d	—	1.88
脱硫石膏加固土抗压强度比,%	7d	$\geq 200$	245
	28d	$\geq 200$	278
备注		淤泥质粉质粘土天然含水率为 45%,脱硫石膏土体增强剂和 32.5 复合硅酸盐水泥的掺量均为 19%、水灰比均为 1.0。	

由表 4.2.1 和 4.2.2—3 的检测结果可得出,由于脱硫石膏土体增强剂的废弃物掺量较高,故在胶砂试验中,抗压强度和抗折强度较低,远低于 32.5 水泥的强度。但在加固土抗压强度试验中,脱硫石膏土体增强剂加固土的抗压强度却远远高于水泥加固土的强度。脱硫石膏加固土 7d、28d 抗压强度比均超过 200%。

### 4.3 验收要求

4.3.1~4.3.6 脱硫石膏土体增强剂验收批量、取样和检验等是根据脱硫石膏土体增强剂的实际情况,同时参照相关标准制定的。

## 5 设计

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 由于各种土体的性质和天然含水率差异较大,因此,在设计阶段,应进行不同掺量的加固土配合比试验场,确定脱硫石膏土体增强剂的掺量和水灰比。

**5.1.2** 为验证脱硫石膏土体增强剂的适用性,应进行现场试验。但在初步设计时,竖向承载加固土桩复合地基的承载力可进行估算,故本标准规定“宜进行现场试验,检验脱硫石膏土体增强剂的加固效果。”

**5.1.3** 本条与《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)的规定一致。

同济大学的检测结果表明,与水泥土相比,脱硫石膏土体增强剂具有早期强度高、后期强度发展快的优点,具体如下:

(1)在相同龄期、含水率、掺量和水灰比的情况下,脱硫石膏土体增强剂加固土的无侧限抗压强度是水泥加固土无侧限抗压强度的2~4倍。其具体提高倍数如下:

淤泥质粘土( $w=45\%$ ):2.2~4.6倍;

褐黄色粉质粘土( $w=35\%$ ):1.9~4.3倍;

粉土( $w=31\%$ ):2.5~4.6倍。

其中,龄期为7天的脱硫石膏土体增强剂的无侧限抗压强度基本达到甚至超过90天的普通水泥加固土的无侧限抗压强度。

(2)脱硫石膏土体增强剂加固土的早期(28天龄期以内)强度较高,而且随着龄期的增长,强度提高更加明显,脱硫石膏土体增

强剂加固土的无侧限抗压强度随龄期平均提高 40%~80%，最高可提高约 210%。而普通水泥加固土的早期强度随龄期增长没有脱硫石膏土体增强剂加固土明显，强度平均只提高约 10%~50%，最多提高不足 100%。龄期达到 60 天之后，普通水泥加固土的无侧限抗压强度随龄期的增长相对缓慢，平均提高 0.3%~10%；而脱硫石膏土体增强剂加固土的无侧限抗压强度随龄期增长比较明显，平均提高 20%~40%。

(3)对于水泥加固土和脱硫石膏土体增强剂加固土来说，在其它条件相同时，某个龄期(T)加固土的无侧限抗压强度  $f_{cuT}$  与 28 天龄期加固天的强度  $f_{cu28}$  的比值  $f_{cuT}/f_{cu28}$  与龄期 T 的关系具有一定的归一化性质，且大致呈幂函数关系，具体关系式见表 5.1.3-1。

**表 5.1.3-1 水泥加固土和脱硫石膏土体增强剂加固土无侧限抗压强度与龄期的关系**

	水泥加固土	脱硫石膏土体增强剂加固土
	$\mu=0.6$	
45%淤泥质粘土	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.1936T^{0.4477}$	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.2674T^{0.3992}$
35%褐黄色粉质粘土	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.3883T^{0.3306}$	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.1587T^{0.528}$
31%粉土	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.3447T^{0.3359}$	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.3165T^{0.374}$
	$\mu=1.0$	
45%淤泥质粘土	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.1922T^{0.4497}$	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.0753T^{0.6769}$
35%褐黄色粉质粘土	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.2270T^{0.5093}$	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.2409T^{0.3857}$
31%粉土	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.2177T^{0.4006}$	$f_{cuT}/f_{cu28}=0.4310T^{0.1534}$

在其它条件相同的前提下,两个不同龄期的加固土的无侧限抗压强度之比随着龄期之比的增大而增大。经回归分析得到两者呈幂函数关系,其经验方程见表 5.1.3-2。

**表 5.1.3-2 水泥加固土和脱硫石膏土体增强剂加固土  
无侧限抗压强度之比与龄期之比的关系**

	水泥加固土	脱硫石膏土体增强剂加固土
	$\mu=0.6$	
45%淤泥质粘土	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.4086}$	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.3574}$
35%褐黄色粉质粘土	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.3234}$	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.568}$
31%粉土	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.2437}$	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.2518}$
	$\mu=1.0$	
45%淤泥质粘土	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.4071}$	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.6587}$
35%褐黄色粉质粘土	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.3060}$	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.3877}$
31%粉土	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.4003}$	$f_{cu1}/f_{cu2}=(T_1/T_2)^{0.1593}$

从以上式子可以看出,试验得到的水泥加固土的强度随龄期的变化规律与《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)的分析结果接近。而脱硫石膏加固土的强度随龄期的变化是稳定的。

**5.1.4~5.1.5** 主要参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)。

**5.1.6~5.1.7** 深层搅拌桩如果作为自立式挡土墙,不仅有一定的强度要求,而且还有抗渗要求,即在基坑开挖过程中能挡住基坑外的水;深层搅拌桩如果作为止水帷幕,则一般只有抗渗要求。由此可见,搅拌土渗透系数是很重要的设计计算指标。

同济大学的检测结果表明:

(1)对脱硫石膏土体增强剂加固土和水泥加固土的渗透系数随龄期呈现减小的趋势,即抗渗能力随龄期逐渐增强。总的来说脱硫石膏加固土和水泥加固土的渗透系数都不大于  $10^{-7}$  cm/s 数量级,均满足实际工程的要求。

(2)对淤泥质粘土的加固土来说,其渗透系数在 7 天和 28 天龄期时数量级已达到  $10^{-8}$  cm/s $\sim$  $10^{-9}$  cm/s,在 90 天龄期时多数达到  $10^{-9}$  cm/s。

(3)褐黄色粉质粘土的加固土渗透系数在 7 天和 28 天龄期时数量级达到  $10^{-7}$  cm/s $\sim$  $10^{-8}$  cm/s,在龄期为 90 天时达到  $10^{-8}$  cm/s $\sim$  $10^{-9}$  cm/s。

(4)粉土的加固土渗透系数在 7 天龄期时数量级多数为  $10^{-7}$  cm/s,28 天龄期时降低到  $10^{-8}$  cm/s $\sim$  $10^{-9}$  cm/s,而 90 天以后粉土的加固土渗透系数大部分下降到  $10^{-9}$  cm/s 数量级。

## 5.2 室内配合比试验

**5.2.1** 脱硫石膏土体增强剂中掺加了脱硫石膏、干法脱硫灰和其它活性混合材料,可能会对浆体的施工性能产生影响。确定脱硫石膏土体增强剂的水灰比,目的是通过适当调整水灰比,使得脱硫石膏土体增强剂和水泥的流动性和泵送性能一致。

**5.2.2** 由于脱硫石膏土体增强剂加固土的强度较高,一般情况下,可适当降低掺量。为了做到安全适用、经济合理、确保质量,在施工前,应进行脱硫石膏土体增强剂不同掺量的加固土强度试验,以确定最佳掺量。根据科研成果和工程经验,本规程提出了脱硫石膏土体增强剂的掺量范围,供进行加固土配合比试验时使用。

对于含水量低于 60%的淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土,本规

程提出的脱硫石膏土体增强剂的掺量范围略低于水泥的掺量范围。然而,对于天然含水率较高(60%~100%)的吹填土、天然含水率相当高(100%以上)的淤泥,加固土的强度会显著降低,只有较大幅度地提高加固材料的掺量,才能达到设计要求。

根据同济大学的检测结果,脱硫石膏土体增强剂和水泥在不同掺量、不同含水率的条件下,室内加固土试验结果如下:

(1)对于龄期 28 天的脱硫石膏加固土和水泥加固土(淤泥质粘土,含水率  $w=45\%$ ),不同掺量的脱硫石膏加固土无侧限抗压强度相对于普通水泥加固土的无侧限抗压强度均有不同程度的提高,具体提高倍数如下:

水灰比 0.6,掺量 10% : 1.9 倍;

水灰比 0.6,掺量 13% : 3.5 倍;

水灰比 0.6,掺量 15% : 4.0 倍;

水灰比 1.0,掺量 16% : 4.8 倍;

水灰比 1.0,掺量 18% : 4.2 倍;

水灰比 1.0,掺量 20% : 4.4 倍。

从以上对比情况可以看到,早期脱硫石膏土体增强剂加固土的无侧限抗压强度相对于水泥加固土的无侧限抗压强度的提高相对显著,大多在 4~4.8 倍。

(2)对于龄期 90 天的脱硫石膏加固土和水泥加固土(淤泥质粘土, $w=45\%$ ),不同掺量的脱硫石膏加固土的无侧限抗压强度相对于普通水泥加固土的无侧限抗压强度均有不同程度的提高,具体提高倍数如下:

水灰比 0.6,掺量 10% : 1.3 倍;

水灰比 0.6,掺量 13% : 3.2 倍;

水灰比 0.6,掺量 15% : 2.4 倍;

水灰比 1.0, 掺量 16% : 3.5 倍;

水灰比 1.0, 掺量 18% : 4.6 倍;

水灰比 1.0, 掺量 20% : 2.0 倍。

无论龄期为 28 天或 90 天, 当脱硫石膏土体增强剂的掺量为 10% (水灰比  $\mu=0.6$ ) 或掺量为 16% (水灰比  $\mu=1.0$ ) 时, 其加固土的无侧限抗压强度均明显高于掺量为 13%、15% (水灰比  $\mu=0.6$ ) 和掺量为 18%、20% (水灰比  $\mu=1.0$ ) 的水泥加固土无侧限抗压强度。因此在实际工程中可以用相对少量的脱硫石膏土体增强剂来代替水泥, 并且可获得强度更高的加固土, 从而大大降低施工成本。

(3) 对于龄期 28 天的脱硫石膏与淤泥质粘土加固土和水泥与淤泥质粘土加固土, 在其它条件相同的情况下, 脱硫石膏土体增强剂加固土和水泥加固土的无侧限抗压强度均随着掺量的提高而呈提高趋势, 但其中普通水泥加固土的无侧限抗压强度随掺量的提高并不明显, 平均提高约 25%~35%; 脱硫石膏土体增强剂加固土的无侧限抗压强度随掺量的提高平均可达到 45%。

(4) 对于龄期 28 天和 90 天的脱硫石膏与淤泥质粘土加固土和水泥与淤泥质粘土加固土, 在其它条件相同的情况下, 加固土无侧限抗压强度随着含水率的提高呈现如下规律:

28 天:

普通水泥:

水灰比 0.6, 掺量 13%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 0.52 : 0.51;

水灰比 1.0, 掺量 18%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 0.75 : 0.63。

脱硫石膏土体增强剂:

水灰比 0.6, 掺量 13%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 0.82 : 0.76;

水灰比 1.0, 掺量 18%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 1.08 : 0.99。

90 天:

普通水泥:

水灰比 0.6, 掺量 13%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 0.92 : 0.76;

水灰比 1.0, 掺量 18%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 0.72 : 0.69。

脱硫石膏土体增强剂:

水灰比 0.6, 掺量 13%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 1.38 : 1.03;

水灰比 1.0, 掺量 18%, 含水率 35%、45% 和 55% 的强度比:  
1 : 1.39 : 1.09。

从以上结果可以看到, 当含水率在 30%~60% 之间时, 脱硫石膏与淤泥质粘土加固土和水泥与淤泥质粘土加固土的无侧限抗压强度随含水率的增加而减少。

对于水泥加固土, 含水率每增加 10%, 无侧限抗压强度减少约为 10%~50%。而对于脱硫石膏加固土来说, 随着含水率增加, 其无侧限抗压强度比较稳定, 甚至有上升趋势, 这种特点在龄期为 90 天的时候更加明显。

而对于含水率为 55% 的脱硫石膏土体增强剂加固土, 其无侧限抗压强度均高于含水率为 35% 的普通水泥加固土的无侧限抗压强度, 而且大多数都可以达到普通水泥加固土无侧限抗压强度的 2~3 倍。

由此可见,在淤泥质粘土含水率较高时,脱硫石膏土体增强剂比普通水泥对于加固土强度的提高更有优势,更适用于沿江、沿湖、沿河、沿海和暗浜较多的地区或用于水下工程。

### **5.3 现场试验**

**5.3.1** 由于室内试验是在理想条件下进行,搅拌较均匀。而现场施工时,由于搅拌因素、计量控制因素,桩身强度一般低于室内试验的强度。因此,应进行现场试验,检验脱硫石膏土体增强剂的实际效果,为设计方案提供技术依据。

应根据工程实际情况和室内配合比试验结果,制定不同掺量、不同桩长的现场试验方案,以及钻孔取芯、荷载的检验方案。

**5.3.2** 相对于其它检验方法,钻孔取芯的检验方法最直接反映地基加固工程的质量,无侧限抗压强度是加固土最重要的技术指标。本规程对钻孔取芯的检验方法进行了具体的规定,突出了钻孔取芯的重要性,体现了标准的严谨性和先进性。

### **5.4 深层搅拌法**

参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)制定。

### **5.5 高压喷射注浆法**

参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)制定。

## 6 施 工

### 6.1 一般规定

**6.1.1~6.1.2** 深层搅拌桩和旋喷桩的成桩质量主要取决于掺量的准确性和搅拌的均匀性。因此,施工前必须通过工艺性试桩,确定提升速度、灰浆泵压力和喷浆量等施工参数,并在施工中严格执行。

**6.1.4** 脱硫石膏土体增强剂加固土的早期强度较高,因此,壁状加固时,相邻桩的施工时间间隔不应超过 12h,而水泥土桩控制为 24h。

**6.1.5** 由于在高水灰比条件下(1.0),脱硫石膏土体增强剂的浆体泌水率要明显高于水泥。因此,本规程规定了浆液必须在 0.5h~1h 内连续泵送完。

**6.1.6** 脱硫石膏土体增强剂是一种水硬性胶凝材料,受潮会发生水化反应,降低活性,因此,脱硫石膏土体增强剂袋装产品储存时,应采取防雨、防潮措施。

**6.1.7** 脱硫石膏土体增强剂中的石膏含量较高,一些外加剂如木钙、水玻璃等,可能会造成凝结时间异常、强度降低。因此,未经试验,在脱硫石膏土体增强剂中不得掺加外加剂。

### 6.2 工艺性试桩

**6.2.1** 本规程根据工程实践经验,提出喷浆提升速度的控制值,以保证搅拌的均匀性。根据国家和本市相关标准和规程,结合工程实践经验,对提升速度做出如下规定:

1 深层搅拌法:《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202-2002)规定提升速度 $\leq 0.50\text{m}/\text{min}$ ,本规程与国家标准保持一致。

2 高压旋喷注浆法:《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202-2002)未规定。上海市工程建设规范《地基处理技术规范》(DG/TJ08-04-2010)规定提升速度可取 $0.05\text{m}/\text{min} \sim 0.25\text{m}/\text{min}$ ,或根据工程要求和工程经验或试验确定。

本规程规定承重加固土桩的提升速度为 $0.05\text{m}/\text{min} \sim 0.25\text{m}/\text{min}$ ,支护、止水加固土桩的提升速度为 $0.05\text{m}/\text{min} \sim 0.10\text{m}/\text{min}$ 。

**6.2.2** 严格控制掺量是保证加固土桩身强度的关键。通过调节灰浆泵压力,严格控制喷浆量。整根桩的掺量经核算后,应不低于设计值。

### 6.3 深层搅拌法

参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)制定。

### 6.4 高压喷射注浆法

参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)制定。

## 7 质量检验

脱硫石膏土体增强剂用于工程中的质量检验,主要参照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)和上海市工程建设规范《地基处理技术规范》(DG/TJ08-04-2010)制定。

## 附录 A 胶凝材料浆体流动度的测定

**A. 0. 2~A. 0. 3** 脱硫石膏土体增强剂和水泥浆体流动度的测定方法,主要参照国家标准《混凝土外加剂均质性试验方法》(GB/T 8077—2000),结合深层搅拌法和高压旋喷注浆法的施工参数制定。

## 附录 B 浆体经时泌水率的测定

**B. 0. 3** 主要参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2008), 结合深层搅拌法和高压旋喷注浆法的施工参数制定。

**B. 0. 4** 经时泌水率的公式推导如下:

GB/T 50080—2008 中的公式为:

$$B = \frac{V_w}{(W/G)} \times 100$$
$$G_w = G_1 - G_0$$

式中  $B$  —— 经时泌水率(%)；  
 $V_w$  —— 规定时间内的泌水总量(mL)；  
 $G_w$  —— 浆料试样质量(g)；  
 $W$  —— 混凝土拌合物总用水量(mL)；  
 $G$  —— 混凝土拌合物总质量(g)；  
 $G_1$  —— 试样筒及试样总质量(g)；  
 $G_0$  —— 试样筒质量(g)。

对于搅拌桩或旋喷桩浆体来说, 拌合物只有脱硫石膏土体增强剂(或水泥)、水两种材料, 故推导如下:

因此, 浆体的经时泌水率的公式为:

$$W/G = W(W+C) = 1/(1+C/W) = 1/(1+1/\mu)$$

式中  $B$  —— 经时泌水率(%)；  
 $V_w$  —— 规定时间内的泌水总量(mL)；  
 $G_w$  —— 浆料试样质量(g)；  
 $\mu$  —— 水灰比。

## 附录 C 室内加固土抗压强度试验方法

**C. 0. 2~C. 0. 5** 脱硫石膏土体增强剂的室内加固土抗压强度试验方法,主要参照上海市工程建设规范《地基处理技术规范》(DBJ08-40-2010)制定,并结合脱硫石膏土体增强剂的特点,提出了脱硫石膏加固土抗压强度比的试验方法。