

# 粉体喷射搅拌法加固软土地基及其设计与计算

铁道部第四勘测设计院 白日升

## 一、概 述

粉体喷射搅拌法加固软粘土技术,是以生石灰粉、水泥粉等粉体材料做加固料,通过专用的粉体喷搅施工机械,用压缩空气将粉体加固料以雾状喷入地基中,凭借钻头叶片的旋转使粉体加固料与原位软粘土搅拌并得到充分混合,从而使软粘土硬结,形成具有整体性强、水稳性好和足够强度的柱体。这种柱体可用来加固道路、桥涵及工业民用建筑物基础,加固滑坡和土坡;做成地下连续墙以代替板桩支撑加固沟槽坑壁等。在瑞典这种加固方法称做“石灰柱法”(Lime Columns Method)。在日本这种加固方法称做粉体喷射搅拌法(Dry Jet Mixing Method)简称DJM法。因为粉体加固材料不限于生石灰粉,而且添加料也有多种,所以目前国内外取名多沿用后者。

粉体喷射搅拌法加固软土技术,1967年由瑞典的Kjeld Paus提出,1971年进行了首次现场试验,1974年正式取得专利并应用于工程实践。瑞典Linden—Alimak公司所生产的成柱施工机械,成柱直径500毫米,最大加固深度10~15米。目前瑞典石灰柱施工延长米数已达数百万米。日本于1981年开始把这项技术应用于工程实践,施工机械的成柱直径为800~1000毫米,并有单轴和双轴两种机型,后者可同时成柱两根,最大加固深度为10~30米,仅1983年4月至11月,用该法加固土体就达到23亿立方米。

由于粉体喷搅法加固软土技术,以粉体做为加固料,不需向地基土内注入附加水分,并能通过化学作用充分吸收周围水分,因此加固后地基的初期强度高,对于含水量大的软土,加固效果尤为显著。按照不同地基土的性质及设计要求所要达到的地基强度,可以事先合理选择加固料种类及灰土配比,设计灵活;采用此法加固地基可以减少地基的沉降量,而不需经过排水固结法中的预压过程;粉体喷射不需高压设备,安全可靠;无污染,无振动,对周围环境及建筑物无不良影响。近十多年来,粉体喷射搅拌法加固软土技术在瑞典、芬兰、法国、英国、联邦德国、美国、加拿大等国家得到广泛应用。在我国铁道部第四勘测设计院于1983年开始研究试验,1984年首次将此法应用于广东省云浮硫铁矿专用铁路的一处涵洞软土地基加固取得成功。后来相继在武昌和连云港用于下水道沟槽地下连续墙和铁路涵洞基础加固,均获得良好效果。粉体喷射搅拌法主要用来解决下列问题:

1. 增加软土地基的承载能力;
2. 减少软土地基的总沉降和不均匀沉降;
3. 增加边坡的稳定性;
4. 在沟槽和深层开挖工程中建成连续墙代替板桩支撑;
5. 减少桩基结构物和其它支撑结构周围的不均匀沉降,减少桩基由于地下水位降低与

排水管道破裂的不良影响所引起的负摩擦力。

## 二、粉体喷射搅拌法的原理

粉体喷射搅拌法是在软土地基中输入粉粒体加固材料,通过和原位地基土强制性的搅拌混合,使地基土和加固材料发生化学反应,在稳定地基土的同时提高其强度的方法。

### 1. 施工原理

由空气输送的加固材料,向着通过搅拌叶片旋转产生的空隙部位喷出。喷出的加固材料随着搅拌叶片的旋转均匀散布在整个空隙轨迹面内,进而和原位地基土搅拌并混合在一起。和加固材料分离后的空气就沿着搅拌轴,由轴与土的缝隙处排出地面。

### 2. 固结原理

原位土和石灰、水泥等加固材料混合后,通过固结反应(Pozzolan),水化反应等,在短期内就可形成稳定的固结土。

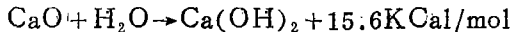
粉体喷射搅拌法使用的加固材料除石灰、水泥之外,有石膏及矿渣等。还可使用粉煤灰、下水污泥焚烧灰做为添加料。但是,在目前实际工程中使用的主要是石灰和水泥,这里集中介绍它们的固结反应。

#### (1) 采用石灰做加固料的固结原理

使用石灰加固地基是利用土与加固材料相互间的化学变化,使土中的微粒粘土成分发生质的变化。用石灰加固土时,有以下几种作用。

##### ① 石灰的吸水、发热、膨胀作用

在软弱地基中加入生石灰,它便和土中的水分发生化学反应,形成熟石灰。在这一反应中,有相当于生石灰重量32%的水分被吸收。



形成熟石灰时,每一摩尔产生15.6千卡的热量,通过一公斤的CaO的水化作用,发出280千卡热量。这种热量又促进了水分的蒸发。从而使相当于生石灰重量47%的水分蒸发掉。也就是说,形成熟石灰时土壤中总共减少了相当生石灰重量79%的水分。另外,由生石灰变为熟石灰的过程中,石灰体积膨胀一至二倍,促进了周围土的固结。

##### ② 离子交换作用与土微粒的凝聚作用

刚变为熟石灰后,它处于绝对干燥状态,有很强的吸水能力。这种吸水作用持续到与周围土平衡为止,进一步降低了周围土的含水量。在这种状态下,化学反应式如下:



粘土颗粒在天然状态下带有负电荷,在其较厚的结合水层中,一般都有一价的钠( $\text{Na}^+$ )、钾( $\text{K}^+$ )离子。二价的钙( $\text{Ca}^{2+}$ )离子与扩散层中的一价钠、钾离子发生离子交换作用。经过离子交换作用,钙吸附在粘土颗粒的表面,改变了粘土颗粒表面的带电状态,使双电层中的扩散层减薄,结合水减少,因而使粘土粒间的结合力增强。粘土颗粒因凝聚化作用呈团粒化现象,从而改变了土的性质。

以上两种作用在土与石灰混合后两天左右就完成了。

##### ③ 化学结合作用(固结反应)

上述离子交换后,随着龄期的增长,则胶质二氧化铝和石灰发生反应,形成复杂的化合物。反应生成物有硅酸钙水合物和 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ 等铝酸钙水合物及钙铝黄长石水合物( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )等。这些水合物的形成,要经过长时间的缓慢过程,它们在水中和空气中逐渐硬化,与土颗粒粘结在一起,形成网状结构,结晶体在土颗粒间相互穿插,盘根错节,使土颗粒联系得更加牢固,改善了土的物理、力学性能,发挥了结合材料的强度。这种反应为固结反应(Pozzolan),使得加固处理土强度增高并长期保持稳定。

利用石灰固化处理地基的作用,分为形成熟石灰快速反应的前半过程与形成熟石灰以后缓慢的后半过程。

地基土掺加一定数量的生石灰后,所产生的高温和高PH值(可超过12),促进了土中的化学反应。

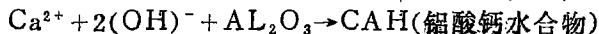
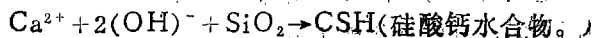
### (2) 采用水泥做拌合料的固结原理

水泥的主要成分是二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、氧化钙( $\text{CaO}$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),它们是形成水硬性结合材料的重要基本物质。

水泥加入软弱地基中,吸收土中的水分,形成水泥水化物与熟石灰。其化学反应如下:



熟石灰经过离子化作用分解成钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )和氢氧离子( $\text{OH}^-$ )。钙离子吸附在土颗粒表面,和粘土矿物质氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )反应,生成石灰水合物。



这个过程称为胶结作用,和固结反应同属一种反应。

由于水泥含有氧化硅、氧化铝粘土矿物,有水存在的话,就产生凝结、硬化现象,所以它是自固结材料。在地基加固中,水泥做为土颗粒的粘结剂,起加固作用,所以必须有超过规定数量的水泥均匀地散布在地基内。

### 3. 粉体与土拌合后土的物理力学性质的变化

为了研究不同类型软土的石灰加固效果,铁道部第四勘测设计院曾先后选择了我国南方两处有机质含量较高,及中南地区一处有机质含量一般的软土,事先按不同的含水量,不同的加固料及掺入量和不同的养护龄期制成试件,进行各种物理、力学性试验,以寻找灰土的最佳加固效果及最佳配比。大量试验结果表明:

(1) 加灰后软土的液性指数 $I_L$ 随着含灰量的增加呈线性递减。当制备含水量小于50%时,加灰后的液性指数 $I_L$ 很快小于零,而使土从原来的流塑状态进入半固态或固态,提高了土的强度。

(2) 在一定的稳定压力下,灰土的压缩量随着石灰粉含量的增加呈线性递减。

从图中可以看出,当加灰量为15%,稳定压力为 $\Delta P = 300\text{kPa}$ ( $3.0\text{kgf/cm}^2$ )时,其压缩量减少近三倍。

(3) 加灰以后软土的压缩系数 $\alpha_v$ 减小,侧限变形模量 $E_s$ 增大,详见表1。

$P = 100 \sim 300\text{kPa}$ 加灰后灰土的压缩系数 $\alpha_v$ 及侧限变形模量 $E_s$

(4) 加灰后软土的无侧限抗压强度变化

软土经过加固后,其强度一般用无侧限抗压强度来表示。

表 1

	天然地基	7 天 龄 期	28 天 龄 期	3 月 龄 期
$\alpha_r$ (kPa) <sup>-1</sup>	0.0006	0.00007	0.00007	0.00005
$E_s$ (kPa)	3200	27400	27400	37700

注:土样取自广东腰古云硫铁矿专用线

取自广东腰古云浮硫铁矿专用线的试样表明,其原状土的无侧限抗压强度为 27kPa (0.27kgf/cm<sup>2</sup>),加入生石灰并掺加少量石膏后,灰土的无侧限抗压强度明显提高。不同龄期下其无侧限抗压强度 $q_u$ 见表 2。

加灰后土的无侧限抗压强度

表 2

龄 期	7 天	28 天	3 月
$q_u$ (kPa)	454	785	1309

(5) 加灰后软土的抗剪强度指标 $C$ 、 $\phi$ 值均有明显提高。软土加灰后的抗剪强度变化见表 3。

加灰后灰土的抗剪强度指标

表 3

龄 期	天然地基	7 天	28 天	3 月
$C$ (kPa)	8	101	178	330
$\phi$ (°)	7°41'	41°59'	38°56'	35°45'

注:土样取自广东腰古云硫铁矿专用线

上述灰土室内试验成果表明,软土采用石灰搅拌加固后,其物理力学性质均有了明显的改善。在提高地基承载力,减小地基沉降变形方面,其加固效果是肯定的。

有关的专家们曾证明:加入生石灰通常能增加软粘土的透水性。然而, Terashi 和 Tanaka (1983) 曾观察到对海相粘土增加石灰含量,透水性减少。当采用水泥加固时,这种减少是大的。

铁道部第四勘测设计院从广东省肇庆取原状土样分析粘土颗粒含量为 49.63%,掺入 15% 的生石灰粉后,其粘土颗粒含量降低至 18.98%。证明软粘土加入生石灰后使颗粒粗化,增加了土的渗透性。石灰柱在不同类型的粘土中起到排水作用,这种情况在斯堪的纳维亚半岛最为常见,并能提高沉降速率。

### 三、粉体喷射搅拌法加固软土地基的设计计算

粉体喷搅法加固软土地基的主要内容:决定设置搅拌柱的范围,选择柱长及确定柱的根数,使之能满足建筑物所要求的承载力与允许沉降量。

#### 1. 应取得的资料

(1) 建筑物资料: 荷载总重、基础埋置深度、所要求的地基允许承载力及允许沉降量。

(2) 工程地质资料: 通过勘探取得附有地质资料的平面、纵断面、横断面图; 地质柱状图。通过原位测试和室内试验, 取得天然地基及灰土的各项物理、力学性指标, 化学性状指标等, 以便对工点进行评价及提供设计使用。

灰土室内试验的步骤是: 将现场取回的土样与加固料均匀搅拌后制备灰土试件。试件的数量, 由含水量、含灰量及养护龄期三个因素决定。含水量为天然地基的含水量; 养护龄期分别为7天、28天和90天; 含灰量视天然含水量而定, 含水高时, 含灰量可取10%~15%; 含水量低时, 可取6%~10%, 根据实际情况予以增减。然后按不同的含灰量和不同的养护龄期, 排列组合成多组灰土制备试件, 经养生后进行试验, 以选取最佳含灰量做为设计掺灰量。

制备试件时, 水灰应搅拌均匀。养护条件最好接近于柱体周围软土地层中的实际情况。按照Broms教授在我国讲学时建议的塑料袋养生法, 也就是将制备土样装入塑料袋内, 封闭后置入水中养护的方法是可行的。

## 2. 设计步骤

(1) 根据基础尺寸及软土范围决定采用粉体喷搅加固的范围。根据软土层的厚度决定搅拌柱体的长度, 一般情况下, 柱体应伸至软土层底部。

(2) 根据要求承载力的大小, 初步选定搅拌柱的间距, 从而定出加固范围内搅拌柱的总数及每平方米内搅拌柱所占的面积。搅拌柱的排列, 一般呈等边三角形布置, 有时也可按正方形布置。

(3) 根据初步选定的柱长 $H$ 、加固宽度 $B$ 、加固长度 $L$ , 搅拌柱总数 $N$ , 搅拌柱面积与加固基础面积之比(灰、土置换率) $\alpha$ , 每排(宽度 $B$ 范围内)柱的根数, 以及上述已取得的建筑物资料, 进行如下设计计算:

### ① 地基承载力计算

地基承载力计算, 除按复合地基计算其平均允许承载力外, 尚应考虑柱体应力集中后柱体与周围土的应力检算。

#### A、复合地基承载力计算

##### a、加固后复合地基的平均允许承载力

$$[\bar{\sigma}_c] = \alpha \cdot [\sigma_{c,01}] + (1 - \alpha) \cdot [\sigma_s]$$

必须满足条件  $\sigma_c \leq [\bar{\sigma}_c]$

式中  $[\bar{\sigma}_c]$ ——复合地基的平均允许承载力;

$[\sigma_{c,01}]$ ——搅拌柱的允许承载力;

$[\sigma_s]$ ——天然地基土的允许承载力;

$\alpha$ ——灰、土置换率  $\alpha = \frac{N \cdot A_{c,01}}{A}$ ;

$A_{c,01}$ ——搅拌柱面积;

$A$ ——基础底面积;

$N$ ——搅拌柱的数量;

$\sigma_c$ ——建筑物在地基上的平均接触压应力。

#### b、复合地基的柱、土应力检算

在复合地基的地表面有荷载时,因搅拌柱的压缩性比周围软粘土的压缩性小,在压缩变形相一致的条件下,搅拌柱上产生应力集中现象。复合地基应力按下列方法检算:

$$\sigma_{col} = \sigma_c \cdot \mu_{col}$$

$$\sigma_s = \sigma_c \cdot \mu_s$$

$$\mu_{col} = n / \{1 + (n-1)\alpha\} > 1$$

$$\mu_s = 1 / \{1 + (n-1)\alpha\} < 1$$

式中  $\mu_{col}$ ——应力集中系数;

$\mu_s$ ——应力减少系数;

$n = \frac{\sigma_{col}}{\sigma_s}$ ——应力分担比;

$\sigma_{col}$ ——搅拌柱承担的压应力;

$\sigma_s$ ——天然地基土承担的压应力。

必须满足条件:  $\sigma_{col} \leq [\sigma_{col}]$

$$\sigma_s \leq [\sigma_s]$$

#### B、柱群总承载力

$$Q_{柱群}^{qz} = 2C_u \cdot H \cdot (B+L) + (6 \sim 9)C_u \cdot B \cdot L$$

系数6适用于长度L大于宽度B的基础。对于正方形基础,最好使用系数9。

必须满足条件:  $Q_{柱群}^{qz} > P$

式中  $Q_{柱群}^{qz}$ ——柱群总承载力;

$C_u$ ——土的不排水抗剪强度;

$B$ ——柱群的宽度;

$L$ ——柱群的长度;

$H$ ——柱群的高度;

$P$ ——建筑物的总荷载。

#### ② 总沉降量计算

A、第一种情况是施加的荷载较小,不超过柱的徐变极限 $Q_{柱}^{qz}$ 时总沉降量 $S$ 的计算见图1。

$$S = S_1 + S_2$$

$$S_1 = \frac{\sigma_c \cdot H}{\alpha \cdot E_{col} + (1-\alpha)E_s}$$

式中  $S$ ——总沉降量;

$S_1$ ——被加固块体的局部沉降;

$S_2$ ——被加固块体下部未加固土的沉降;

$E_{col}$ ——搅拌柱的弹性模量(通过室内试验或现场荷载试验取得);

$E_s$ ——未加固土的侧限变形模量(通过室内试验取得)。 $S_2$ 可用常规的沉降计算方法(如分层总合法)计算。

B、第二种情况是施加于柱的轴向荷载高达徐变极限时,总沉降量 $S$ 的计算(见图2)。

$$S = S_1 + S_2$$

基础底面的荷载强度 $\sigma_0$ 分为两部分, $\sigma_{c1}$ 部分为柱所承受, $C_2$ 部分为柱间未加固土所承受。

$$\sigma_{c1} = \frac{NQ_{c1} \cos \alpha}{B \cdot L}$$

$$\sigma_{c2} = \sigma_0 - \sigma_{c1}$$

$\sigma_{c2}$ 作用于地表面,用以计算加固块体底部以上的局部沉降 $S_1$ , $S_1$ 可用分层总合法计算求得。 $\sigma_{c1}$ 传递到加固块体的底部,用以计算加固块体下部的沉降 $S_2$ , $S_2$ 可按分层总和法计算求得。

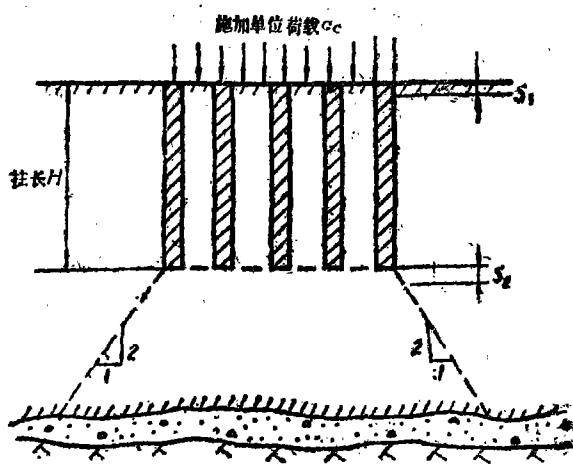


图1 当不超过柱的徐变强度时的沉降计算

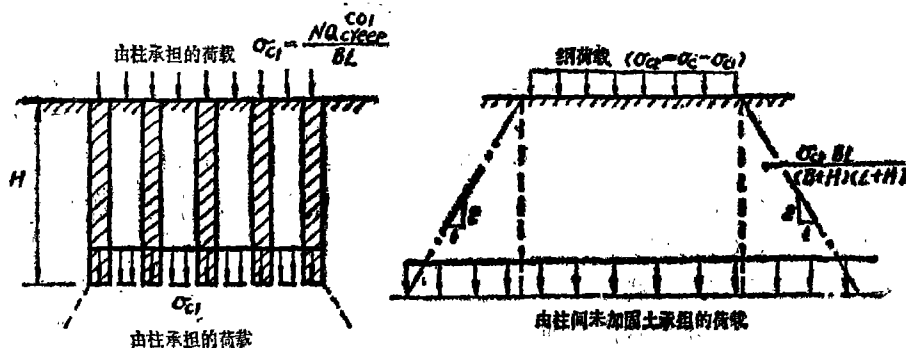


图2 当超过柱的徐变强度时的沉降计算

## 四、施工工艺

### 1. 施工机械

#### (1) 钻机

钻机是粉体喷射搅拌法施工的主要成柱机械。为便于运输,钻机及桅杆架可安装在载体(如汽车)上,也可用汽车单独运至工地后,移至于地面进行操作。

#### (3) 空压机

粉体喷搅法的粉体喷出,是以空压机做为风源。空压机的选型,主要受加固工程的地质条件和加固深度所控制。

粉体喷射搅拌法与旋喷法(CCP工法)不同。粉体喷射搅拌法是以机械强制拌拌气粉混合物只需克服喷灰口处土及地下水的阻力而喷入土中,通过搅拌叶片的机械搅拌作用,使灰、土混合,形成加固柱体;旋喷法则是依靠高压脉冲泵所喷射的高压水来破坏土层。因此,粉体喷射搅拌法所用空压机的压力不需要很高。此外,空压机的风量也不宜太大。

#### (4) 搅拌钻头

粉体喷射搅拌法凭借搅拌钻头叶片的搅拌作用使灰粉与软土混合,因此搅拌钻头的形状直接影响灰、土的搅拌效果。钻头的型式应保证于反向旋转提升时,对柱中土体有压密作用,而不是使灰、土向地面翻升而降低柱体质量。

#### 2. 粉体喷搅法的工艺要求和作业顺序

##### (1) 地基加固的工艺性设计

为了保证地基加固效果,必须事先进行工艺性设计,并在施工过程中据此严格控制。

##### ① 灰、土搅拌效果计算

灰、土的搅拌效果,通常用土体中任一点经钻头搅拌的次数 $G$ 来控制。

$$G = \frac{h \cdot \sum Z}{V} \cdot N$$

式中  $h$ ——钻头叶片垂直投影高度;

$\sum Z$ ——钻头叶片总数;

$N$ ——搅拌轴转速;

$V$ ——钻头提升速度。

##### ② 单位时间内的粉体喷出量计算

粉体发送器单位时间内粉体的喷出量 $q$ 按下式计算。

$$q = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot r_d \cdot A \cdot V$$

式中  $r_d$ ——软土的干容量;

$A$ ——含灰量,由室内试验提供;

$V$ ——钻头提升速度;

$D$ ——钻头直径。

##### (2) 场地的清理

当工作场地表层硬壳很薄时,需先铺填砂、砾石垫层,以便机械在场区内顺利移动和施钻,但不宜铺垫碎石材料,以免给施钻造成困难。如果场地填有石质材料或植有树木,需将石质材料、树木及其根部挖除。

##### (3) 粉体材料技术要求 (以生石灰粉为例)

① 石灰应该是细磨的。在搅拌过程中,为了防止柱中石灰聚集,石灰最大粒径应小于0.2厘米。

② 石灰应尽量纯净无杂质。石灰中氧化钙和氧化镁的总和至少应为85%,其中氧化钙含量最好不低于80%。

③ 生石灰粉的流性指数不低于70%。

##### (4) 施工顺序。

① 柱体对位:根据设计,首先确定加固机体的位置,并使搅拌轴保持垂直。

② 下钻:启动搅拌钻机,钻头边旋转边钻进。此时并不喷射加固材料,为了不致堵塞喷射口而是喷射压缩空气。钻进时喷射压缩空气,可使钻进顺利,负载扭矩小。随着钻进,准备加固的土体在原位受到搅动。



③ 钻进结束：钻至设计标高后停钻。

④ 提升：启动搅拌钻机，钻头呈反向边旋转边提升，同时通过粉体发送器将加固粉体料喷入被搅动的土体中，使土体和粉体料进行充分拌合。沿深度方向，加固材料的混合量，系根据发送器输出的加固材料数量与搅拌叶片提升速度的关系确定。

⑤ 提升结束，柱体形成：当钻头提升至距离地面30~50厘米时，发送器停止向孔内喷射粉料，成柱结束，由于装置的回路是封闭的，在回路内的输送过程中，粉体不会向空中喷发与飞散。实践证明粉体向土体喷射过程中的提升最后阶段，若在搅拌钻头距地表30~50厘米处停止喷粉，则粉粒不会溢出地面。一般常限制在距地表50厘米处停止喷粉。

## 五、效果 检 验

1. 外观检查：施工结束后，对开挖出来的柱体，量测其直径应符合设计要求，柱身应连续匀称，灰土拌合应均匀，用打击物冲击应有坚实感（见图10）。

### 2. 室内外试验

（1）在开挖出来的柱体上切取试件，在保持养生的条件下送试验室进行立方强度和无侧限抗压强度试验。试验结果应满足设计要求的强度。

（2）对切取的试件进行压缩试验，其变形模量应满足设计要求。

（3）开工前按设计要求喷搅试验柱，经过养生后进行现场荷载试验。试验结果柱体强度应满足设计要求。

## 六、实 例

### 1. 工程概况

广东省云浮硫铁矿铁路专用线一孔4.5米盖板箱涵，路基填土高6米。涵洞位于平坦谷地的水稻田中。涵基位于流塑的淤泥质砂粘土上，设计要求承载力为200kPa(2.0kgf/cm<sup>2</sup>)，地基允许承载力为80kPa(0.8kgf/cm<sup>2</sup>)。因为承载力不能满足要求，且沉降量较大，遂采用粉体喷射搅拌法加固软土地基。

粉体喷射搅拌法所用的粉体材料为生石灰粉。鉴于地基上属酸性反应，为提高加固效果，掺入3%的半水石膏(CaSO<sub>4</sub>· $\frac{1}{2}$ H<sub>2</sub>O)。基础范围内共喷搅成柱321根，柱径0.5米，总延长2408米，加固土体的灰、土置换率为32%（见图11）。

加固深度9.0米，自基础底标高12.22米算至柱底标高4.85米，实际基础底面以下柱长7.37米。

### 2. 土层分析和各土层物理力学性质

（1）0米~1.0米：种植土，粘砂土，软塑；

（2）1.0米~2.2米：粉砂、黄褐色至灰色，饱和中密；

（3）2.2米~7.2米：淤泥质砂粘土，灰色，流塑，局部有粉细砂夹层；

$r=17.1\sim18.4\text{kN/m}^3(1.71\sim1.84\text{t/m}^3)$ ， $W=37.2\%\sim51.4\%$ ， $W_p=23.3\%\sim26.7\%$ ， $W_L=35.4\%\sim43.8\%$ ， $e=1.30\sim1.35$ ， $C_u=8\sim12\text{kPa}(0.08\sim0.12\text{kgf/cm}^2)$ ， $\phi_u$ 。

$=2^{\circ}14'\sim10^{\circ}06'$ ,  $q_u=11\sim19\text{kPa}(0.11\sim0.19\text{kgf/cm}^2)$ ,  $a_v=0.0006\sim0.0007(\text{kPa})^{-1}(0.06\sim0.07\text{cm}^2/\text{kgf})$ ,  $[\sigma_s]=80\text{kPa}(0.8\text{kgf/cm}^2)$ ,  $\text{PH}=3.2$ ,  $E_s=3256\text{kPa}(32.56\text{kgf/cm}^2)$ , 有机质含量 $=11.4\%$ 。

(4) 7.2米~9.0米: 泥炭质、淤泥质砂粘土, 黑色、含30%的朽木。

$r=12.5\sim16.1\text{kN/m}^3(1.25\sim1.61\text{t/m}^3)$ ,  $W=51.1\%\sim146.3\%$ ,  $W_p=25.8\%$ ,  $W_L=38.8\%$ ,  $q_u=32\text{kPa}(0.32\text{kgf/cm}^2)$ ,  $[\sigma_s]=150\text{kPa}(1.5\text{kgf/cm}^2)$ ,  $E_s=882\text{kPa}(8.82\text{kgf/cm}^2)$ 。

(5) 9.0米~11.2米: 淤泥质砂粘土, 灰色、软塑。

$r=16.3\sim18.3\text{kN/m}^3(1.63\sim1.83\text{t/m}^3)$ ,  $W=37.7\%\sim50.3\%$ ,  $W_p=21.8\%\sim28.7\%$ ,  $W_L=37.1\%\sim46.5\%$ ,  $e=1.08\sim1.43$ ,  $C_u=16\text{kPa}(0.16\text{kgf/cm}^2)$ ,  $\phi_u=3^{\circ}29'$ ,  $q_u=25\text{kPa}(0.25\text{kgf/cm}^2)$ ,  $a_v=0.00108(\text{kPa})^{-1}(0.108\text{cm}^2/\text{kgf})$ ,  $E_s=2000\text{kPa}(20\text{kgf/cm}^2)$ ,  $[\sigma_s]=140\text{kPa}(1.4\text{kgf/cm}^2)$ 。

(6) 11.2米以下: 黄褐色粘土, 为硬底层。

### 3. 涵洞基础设计有关资料

(1) 基础底面标高12.22米; 根据铁路涵洞结构特点要求地基设计承载力达到200 kPa。

(2) 矩形基础宽度 $B=11.7$ 米, 基础长度 $L=16.89$ 米;

(3) 柱端标高4.85米。

(4) 基础底面以上荷载总重 $P=21393.8\text{kN}$ 。

(5) 石灰柱的极限荷载强度为900kPa, 其允许荷载强度 $[\sigma_{\text{col}}]=\frac{900}{2}=450\text{kPa}$ 。

(6) 石灰柱的无侧限抗压强度(7天龄期) $q_{u7}=454\text{kPa}$ 。

(7) 粉体材料的化学成分:

① 生石灰粉化学成分(见表4)。

② 石膏粉化学成分(见表5)。

生石灰粉化学成分(%)

表4

CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	酸不溶物质
83.3	2.26	0.5	0.78	1.87

石膏粉化学成分

表5

CaO	SO <sub>3</sub>	结晶水	酸不溶物质	总硫酸钙含量
35.7	50.01	5.16	5.69	85.04

## 4. 设计计算

### (1) 搅拌柱的布置

在线路中线两侧各3.5米以内的范围里, 每平方米设置石灰柱两根; 在3.5米以外至涵基边缘之内, 每平方米设置石灰柱一根, 共设柱321根。

柱身自地面向下长9.5米, 基础底面以下柱长7.37米。柱底以下尚有1.7米厚的淤泥质粘土层。

## (2) 地基承载力计算

## ① 复合地基的承载力计算

A、加固后复合地基的平均允许承载力

$$[\bar{\sigma}_c] = \alpha \cdot [\sigma_{c,0.1}] + (1 - \alpha) \cdot [\sigma_s]$$

$$\alpha = \frac{N \cdot A_{c,0.1}}{A} = \frac{321 \times \frac{\pi}{4} (0.5)^2}{11.7 \times 16.89} = 0.32$$

灰、土置换率

$$[\bar{\sigma}_c] = 0.32 \times 450 + (1 - 0.32) \times 80 = 198.4 \text{ kPa} \approx 200 \text{ kPa} (2.0 \text{ kgf/cm}^2)$$

满足地基要求的承载力。

B、复合地基柱、土应力计算

选用应力分担比  $n = 4$  (施工完成后, 根据基础底面柱和柱间土上埋设的土压盒测定值证明取值符合实际)。

基底压应力

$$\sigma_c = \frac{21393.8}{11.7 \times 16.89} = 108.3 \text{ kPa} (1.08 \text{ kgf/cm}^2)$$

应力集中系数

$$\mu_{c,0.1} = n / \{1 + (n - 1) \cdot \alpha\} = \frac{4}{\{1 + (4 - 1) \times 0.32\}} = 2.04$$

应力减少系数

$$\mu_s = 1 / \{1 + (n - 1) \cdot \alpha\} = \frac{1}{\{1 + (4 - 1) \times 0.32\}} = 0.51$$

$$\text{柱体承担的压应力 } \sigma_{c,d} = \sigma_c \cdot \mu_{c,0.1} = 108.3 \times 2.04 = 220 \text{ kPa} (2.2 \text{ kgf/cm}^2) < [\sigma_{c,0.1}] = 450 \text{ kPa} (4.5 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$\text{被加固土承担的压应力 } \sigma_s = \sigma_c \cdot \mu_s = 108.3 \times 0.51 = 55 \text{ kPa} (0.55 \text{ kgf/cm}^2) < [\sigma_s] = 80 \text{ kPa} (0.8 \text{ kgf/cm}^2)$$

## ② 柱群总承载力

沿线路方向, 因涵洞两侧路基填土荷重引起的地基压缩变形量比已加固的涵洞基础下沉量大, 两者之间的不均匀下沉, 造成加固块体两侧产生负摩擦。

$$\text{负摩擦力 } f_s = 2 \cdot L \cdot H \cdot C_u = 2 \times 16.89 \times 7.37 \times 10 = 2490 \text{ kN} (249 \text{ t})$$

$$\begin{aligned} \text{柱群总承载力 } Q_{\text{柱群}} &= 2 \cdot C_{u,0.1} \cdot H \cdot (B + L) + 7 C_{u,0.1} \cdot B \cdot L = 2 \times 10 \times 7.37 (11.7 + 16.89) \\ &\quad + 7 \times 16 \times 11.7 \times 16.89 = 26347 \text{ kN} (2634.7 \text{ t}) > 21393 + 2490 \\ &= 23883 \text{ kN} (2388.3 \text{ t}) \end{aligned}$$

## (3) 总沉降量计算

总沉降量

$$S = S_1 + S_2$$

现场 7 天龄期的单柱载荷试验得  $E_{c,0.17} = 5500 \text{ kPa} (55 \text{ kgf/cm}^2)$ 。

按 Bengt Broms 法:

柱体变形模量

$$E_{c,0.1} = 25 \sim 50 \sigma_{c,0.1}^{\sigma_{c,0.1}^{\sigma_{c,0.1}}}$$

又柱体徐变极限

$$\sigma_{c,0.1}^{\sigma_{c,0.1}^{\sigma_{c,0.1}}} = 1.5 \sim 2.5 q_u$$

$$q_u = 454 \text{ kPa} (4.54 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$E_{c,0.1} = 25 \times 1.5 \times 454 = 17025 \text{ kPa} (170.25 \text{ kgf/cm}^2)$$

考虑到现场荷载试验为 7 天龄期, 随着龄期的增长, 强度还要增长, 故取

$$E_{eoi} = \frac{5500 + 17025}{2} = 11263 \text{ kPa} (112.63 \text{ kgf/cm}^2)。$$

$$E_s \text{ (两层土的侧限变形模量加权平均值)} = \frac{3256 \times 5 + 882 \times 1.8}{5 + 1.8} = 2628 \text{ kPa} (26.3 \text{ kgf/cm}^2)$$

因施加的荷载小于柱的徐变极限, 故按第一种情况计算沉降量加固块体的沉降量

$$S_1 = \frac{\sigma_c H}{\alpha \cdot E_{eoi} + (1 - \alpha) \cdot E_s} = \frac{108.3 \times 737}{0.32 \times 11263 + 0.68 \times 2628} = 14.8 \text{ cm}$$

$$\text{加固块体以下未加固土的沉降量 } S_2 = \frac{a_v}{1 + e} \cdot H' \cdot P$$

$$\text{其中 } P = \frac{\sigma_c \cdot B \cdot L}{(B + H' \frac{1}{2})(L + H' \frac{1}{2})} = \frac{108.3 \times 11.7 \times 16.98}{(11.7 + \frac{1.7}{2})(16.98 + \frac{1.7}{2})} = 96 \text{ kPa}$$

式中  $H'$  —— 加固块体以下压缩层厚 = 1.7m

$$S_2 = \frac{0.00108}{1 + 1.16} \times 170 \times 96 = 8.16 \text{ cm}$$

$$S = S_1 + S_2 = 14.7 + 8.16 = 22.9 \text{ cm}$$

## 5. 效果及评价

### (1) 柱体外观检查

加固工程结束后 7 天, 进行了基坑的开挖。挖出的石灰柱外观整齐匀称, 柱表面呈螺旋状, 灰土搅拌均匀。基坑一角见图 12。

(2) 基坑开挖时, 石灰柱坚硬, 无法用铲挖除, 必须用丁字镐才能刨除。

(3) 挖出的石灰柱直径, 在粉细砂层内为 520 毫米, 在软土层内为 600~700 毫米。钻头直径为 500 毫米, 柱体体积增大, 对周围土体起了压密作用。

从现场取的柱间原状土试件 (靠近柱体附近) 的室内试验成果与加固前的成果对比表明, 土的强度也得到了较大提高 (见表 6)。

表 6

项 目	$C$ (kPa)	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$q_v$ (kPa)	$W$ (%)
土 样				
加固前的土	8	$7^{\circ}41'$	27	39.2
加固后的柱间土	27	$13^{\circ}23'$	46	30.0

### (4) 石灰柱室内抗压极限强度试验

为了进一步深入了解石灰柱的强度, 在现场原位柱体上截取  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  的立方试件, 作室内抗压强度试验。最终开裂强度为  $900 \text{ kPa} (9 \text{ kgf/cm}^2)$ , 破坏强度为  $1550 \text{ kPa} (15.5 \text{ kgf/cm}^2)$ 。试验结果见表 7。

(参考文献略)