

# 单液硅化灌浆法加固豫西湿陷性黄土地基 施工技术和质量控制

罗 伟

(河南省地勘局第四地质探矿队,河南 三门峡 472000)

**摘 要:**通过总结单液硅化灌浆法加固豫西三门峡地区湿陷性黄土地基的多个成功工程实例,介绍了该法加固本地区湿陷性黄土地基施工工艺及施工质量控制措施。

**关键词:**地基加固;单液硅化灌浆法;豫西湿陷性黄土;质量控制

**中图分类号:**TU472.5 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2007)10-0055-03

**Construction Technology and Quality Control on Consolidation for Wet Subsidence Loess Subgrade in Western Henan Province by Single Fluid Silicification Grouting/LUO Wei** (No. 4 Geology Exploration Team, Henan Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Sanmenxia Henan 472000, China)

**Abstract:** The paper summed up several successful engineering cases of consolidation for wet subsidence loess subgrade in Sanmenxia District with single fluid silicification grouting, introduced the construction technology and control methods for construction quality.

**Key words:** single fluid silicification grouting; wet subsidence loess in western Henan Province; construction quality control

单液硅化灌浆法加固豫西三门峡地区湿陷性黄土地基,主要考虑 2 个方面:第一,自重湿陷性黄土场地新建建筑物与已有建筑物紧邻或虽场地较宽,但不属征地范围,与邻近单位无法协商取得一致,而选用人工挖孔灌注桩基础方案造价昂贵,但采用造价低廉的灰土垫层法或灰土挤密法处理地基时,地基处理外放尺寸不够,局部无法施工,需采用单液硅化注浆法加固处理;第二,非自重湿陷性黄土场地建筑物地基浸水引起湿陷,造成建筑物或设备基础破坏,无法正常使用,采用单液硅化注浆法加固地基,可阻止黄土继续湿陷和建筑物或设备基础沉降,以

提高地基承载力。

## 1 加固场区岩土工程条件

加固场区位于豫西三门峡市黄河南岸Ⅲ级阶地中部,为第四系上更新统风积及中更新统冲-洪积成因类型的黄土状土。依据勘察资料,加固深度范围主要有 2 层土(①层填土已清除):②层黄土状粉质粘土和③层黄土状粉土,一般加固深度 < 10.0 m。地基土湿陷等级为自重Ⅱ~Ⅲ级,通过对 23 个代表性建筑场地共计 449 个土样统计,给出加固深度范围内地基土的主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 场区加固范围内地基土主要物理力学指标表

岩土编号	岩土名称	统计个数	统计项目	天然含水量 $\omega/\%$	重力密度 $\gamma$ $/(\text{KN}\cdot\text{m}^{-3})$	干重度 $\gamma_d$ $/(\text{KN}\cdot\text{m}^{-3})$	天然孔隙比 $e$	孔隙度 $n$ $/\%$	饱和度 $S_r$ $/\%$	液限 $\omega_l$ $/\%$	塑限 $\omega_p$ $/\%$	湿陷系数 $\delta_s$
②	黄土状粉质粘土	127	最大值	22.0	17.7	14.8	0.984	49.6	69.6	27.5	17.4	0.078
			最小值	14.5	15.9	13.5	0.809	44.7	41.8	23.5	15.3	0.015
			平均值	17.5	16.6	14.2	0.897	47.2	52.8	24.8	16.0	0.042
			标准差	2.162	0.735	0.495	0.064	1.774	8.637	1.109	0.587	0.021
			变异系数	0.123	0.044	0.035	0.071	0.038	0.164	0.045	0.037	0.504
③	黄土状粉土	312	最大值	32.5	17.8	13.6	1.234	55.2	85.7	29.1	18.2	0.080
			最小值	13.9	14.0	12.1	0.966	49.1	33.2	24.0	15.6	0.001
			平均值	21.1	15.6	12.9	1.096	52.2	52.2	26.8	17.0	0.036
			标准差	5.169	0.913	0.395	0.070	1.610	14.020	1.337	0.668	0.020
			变异系数	0.245	0.059	0.031	0.063	0.031	0.269	0.050	0.039	0.554

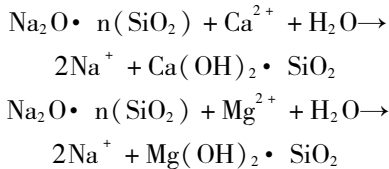
收稿日期:2007-01-16; 改回日期:2007-06-06

作者简介:罗伟(1972-),男(汉族),河南信阳人,河南省地勘局第四地质探矿队勘察公司副经理、工程师,岩土工程专业,从事岩土工程勘察与施工技术管理工作,河南省三门峡市崤山中路 11 号。

## 2 单液硅化灌浆设计与计算

### 2.1 加固湿陷性黄土的机理

单液硅化是由浓度低、粘滞度小的硅酸钠溶液掺入1.5%~2.5%的氯化钠组成,当溶液注入土后,经一定时间,钠离子与土中水溶性盐类中的钙离子(主要为CaSO<sub>4</sub>)产生下列化学反应:



硅酸钠溶液水解后呈碱性,其溶液中的Na<sup>+</sup>与地基中的Ca<sup>2+</sup>发生置换反应,析出硅酸盐凝胶使土体得以加固。由于黄土本身属Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>饱和土,当溶液进入土中后,Na<sup>+</sup>与土(胶粒)表面的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和黄土中的水溶性盐类的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>产生互换反应,即在土颗粒表面形成硅酸凝胶藻膜,最初硅胶薄膜的厚度只有几微米,因而不妨碍溶液注入土中,但相隔4~5 h后,由于硅胶形成的作用很强烈,土中的毛细管网很快被堵塞,土的渗透性即减小,随着胶膜逐渐增厚和硬化,土的强度亦随着时间增长而提高,溶液入土15天左右,土的强度增长速度最快,从而增强土粒间的连结、堵塞土颗粒间隙使土具有抗水性、稳固性、非湿陷性和弱透水性。并提高其抗压和抗剪强度。将硅化加固的黄土长期浸泡在水里,其强度无明显变化。

### 2.2 灌注孔的布置

灌注孔的布置应使欲加固的土体在平面及深度范围内形成整体,灌注孔的平面距离与土的渗透系数、灌注溶液的压力、时间及溶液的粘滞度等因素有关,一般可通过单孔灌注试验确定。通过对23个代表性建筑场地灌注试验经验,正常情况下,灌注孔径为50~70 mm,单孔的加固半径为0.25~0.40 m,灌注孔宜按正三角形或梅花型布置,超出基础底面的宽度,每边不应小于0.5 m,灌注孔之间距离为1.73r(r为土的加固半径),排距为1.5r,局部地层可根据地基土的主要物理力学性质指标进行微调。

加固既有建筑物地基,灌注孔的布置宜根据基础形式、基底面积和单孔的加固半径确定。对条形基础一般沿其两侧布置1~2排竖向灌注孔,对面积较大的独立基础,在其周围除布置1~2排竖向灌注孔外,还应在基础内设置穿透基础的竖向灌注孔,或在靠近基础边缘布置斜向基础中心的灌注孔,以使溶液直接注入基础底面以下的土层中。

### 2.3 溶液用量的计算

硅化加固土的溶液用量与土的孔隙率、饱和度及土粒表面等因素有关,土的孔隙率愈大或土的颗粒愈细,土的表面积愈大,吸收溶液能力愈强。

单液硅化加固黄土,需要的溶液用量可按下式计算:

$$Q = vnd_1a$$

式中: $v$ ——欲加固土的体积,m<sup>3</sup>;  $n$ ——加固前土的平均孔隙率,%;  $a$ ——溶液填充孔隙的系数,一般为0.6~0.8;  $d_1$ ——硅酸钠溶液稀释后的密度,一般为1.13~1.15 kg/L。

当硅酸钠溶液的浓度大于拟加固地基土要求的浓度时,应将其加水稀释,硅酸钠的加水量可按下式计算:

$$g = [(d - d_1)/(d_1 - 1)]N$$

式中: $d$ ——硅酸钠溶液稀释前的密度,一般为1.45~1.53 kg/L;  $d_1$ ——硅酸钠溶液稀释后的密度,kg/L;  $N$ ——硅酸钠溶液稀释前的数量,L。

## 3 施工工艺

### 3.1 工艺流程

单液硅化加固湿陷性黄土地基,施工工艺可分为压力灌注和溶液自渗2种。由于溶液自渗施工工期长,大都在2个月以上,新建工程一般不采用。在此仅介绍压力灌注施工工艺。压力灌注成孔及灌注溶液自上向下分层进行,加固豫西湿陷性黄土地基一般分2层(如果加固深度<5.0 m可不分层),即先施工第一加固层,将带孔的金属灌注管送入第一加固层,随即利用灌注设备将配好的溶液压入该土层中。第二加固层待第一加固层施工完毕后重复上述步骤。

灌浆工艺流程为:设备安装→灌浆孔定位→成孔→验孔→安装灌浆管→安装灌浆堵塞→浆液配制→灌浆→封孔。

### 3.2 成孔及灌浆设备

成孔设备视加固深度、地层及场区条件情况决定采用钻机或人工洛阳铲。灌浆泵采用普通低压、小流量泥浆泵或清水泵,推荐用BW-160型泥浆泵,灌注管采用1 in(Ø25.5 mm)镀锌金属花管。

### 3.3 封孔

封孔采用体积比为1:9(水泥:土)水泥土拌和均匀后夯填捣实至孔口。

## 4 质量控制

### 4.1 成孔质量

(1)必须采用干钻工艺成孔,严禁采用水或泥浆等冲洗液固壁。

(2)灌浆孔的孔位、顺序、孔深、孔径和孔斜按施工图纸要求进行。孔位误差 $\geq 50$  mm。

(3)钻机安装应平整稳固,在钻进过程中要测斜,孔斜 $< 1\%$ ,发现钻孔偏斜超过规定时应及时纠偏。钻孔结束后,孔口要堵盖,防止落物。

## 4.2 灌浆

### 4.2.1 灌浆分段

一般灌浆段长度不宜超过4.0 m或不能超过10个孔。注浆管距孔底不得大于10 cm,灌浆堵塞应塞在非加固深度段段底以上15 cm处,以防漏灌。

### 4.2.2 灌浆方法

灌浆方式采用灌、停循环间歇方法。为了保证灌浆质量,如果加固深度 $> 5.0$  m必须分层灌注,自上向下分层交替、间隔灌注作业。

### 4.2.3 灌浆材料

采用硅化法加固地基,一般使用的液体水玻璃(即硅酸钠),其颜色多为透明或稍许混浊,不溶于水的杂质含量不宜超过2%,硅酸钠的模数 $M$ 值可按下式计算:

$$M = [ \text{SiO}_2 (\%) / \text{Na}_2\text{O} (\%) ] \times 1.032$$

$M$ 值愈大,说明硅酸钠中含 $\text{SiO}_2$ 的成分愈多,因为硅化加固主要是由 $\text{SiO}_2$ 对土的胶结作用,所以硅酸钠的模数值直接影响加固土的强度。试验研究证明, $M$ 值为1的纯偏硅酸钠加固土的强度很小,不宜用于加固地基; $M$ 值在2.6~3.3范围内,加固土的强度可达300~1000 kPa,满足工程要求; $M$ 值在3.3以上时,随着 $M$ 值增大,加固土的强度反而降低,说明 $\text{SiO}_2$ 含量过多对土的强度有不良影响。因此,采用硅化法加固地基,硅酸钠的模数值宜为2.5~3.3。

### 4.2.4 制浆要求

配溶液时,先将拟稀释的硅酸钠溶液送入金属或木制的容器内,然后加入计算加水量及1.5%~2.5%氯化钠,搅拌均匀,浆液高速搅拌的时间 $\leq 30$  s,普通搅拌的时间 $\leq 5$  min,并用密度计测其浓度,稀释后的硅酸钠溶液密度一般为1.13~1.15 kg/L,如果地基土含水量平均值 $> 22\%$ ,可适当提高密度

至1.18~1.25 kg/L。符合要求后即可使用。

### 4.2.5 灌浆参数

施工中及时收集施工过程中的反馈信息,根据变化情况,及时调整灌浆压力、速度、时间参数,以达到最优效果。

由于湿陷性黄土渗透系数较小,一般为0.5~2.0 m/d,浆液渗透较困难,如果压力过大,加固土体易形成劈裂通道,不但造成浆液大量流失浪费,而且浆液不能均匀渗透入被加固土体,不符合本法加固机理,更达不到单液硅化加固目的;压力过小,浆液渗透缓慢且影响加固效果。因此灌浆压力、速度等参数的调控是灌浆成败的决定性因素。具体操作步骤方法如下:

初始灌注时采用30~50 L/min泵量,泵压调整到100 kPa左右,当孔压瞬时达到250 kPa以上时,立即停止灌注并关闭止回阀,通过孔内压力使浆液均匀渗透,当压力表显示孔内压力降到20 kPa以下时,开泵继续灌注,如此循环当达到理论计算吃浆量即可停止。局部出现窜浆和冒浆时应立即停灌封堵,然后跳打间隔灌注。

## 5 质量检查

灌浆结束10天后,在加固范围内采用动力触探和探井取样方法,对加固效果进行检测,以确定加固土承载力和湿陷性消除情况。

## 6 结语

(1)单液硅化灌浆加固法需用水玻璃和氯化钙等工业原料,成本较高,其优点是能使土的强度得到很大提高。但对于酸性土和已渗入石油产品、树脂和油类的地基土,不宜采用硅化法加固。

(2)湿陷性黄土的孔隙率很高,常达其总体积的45%~50%,地下水位以上的天然含水量较小,孔隙内一般无自由水,溶液入土后不致稀释,有利于采用单液硅化加固湿陷性黄土地基,并能获得较好的加固效果。

(3)随着城市建设规模的发展和建筑物密度的不断增大,单液硅化灌浆加固法的使用越来越多,作用愈强。