

# 高压喷射注浆复合地基处理设计及施工实践

孙小杰, 王立新, 吴兆军

(山东省物化探勘察院, 山东 济南 250013)

**摘要:**结合济南市高新开发区浪潮产业园生产厂房地基处理工程实例,介绍了采用二重管高压喷射注浆法复合地基处理的施工工艺,以及处理效果的检验方法。

**关键词:**高压喷射注浆;二重管;复合地基;地基承载力特征值;水泥石

**中图分类号:**TU472.3<sup>+</sup>6 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2007)11-0020-03

## 1 工程概况

浪潮产业园坐落于济南市高新开发区,建设场地位于济南市历城区孙村镇西顿邱村东,南临科航6号路,西临2号路,本期工程占地面积约500亩,拟建生产厂房高3层,长130m,宽76m,独立基础,框架结构,基础埋深-4.5m,单柱荷重最大6000kN。基底下伏黄土和粉质粘土软弱夹层,承载力及变形不能满足上部荷载要求,需进行地基加固处理。

## 2 场地工程地质条件

场地地形较平坦,地貌成因类型为丘陵;勘察期间地下水位埋深12.05~13.45m,据调查最高地下水位5.0m左右,属第四系松散土层中的孔隙潜水,地下水主要以大气降水、地表水渗漏及上游地下径流补给为主。

本场区勘察深度范围内,地基土自上而下依次为:

①层素填土( $Q_4^{ml}$ ),褐色,松散,湿,主要由粘性土组成,见较多植物根系,顶部为耕土,场区普遍分布,厚度0.40~2.60m;

②层粉质粘土( $Q_4^{pl+dl}$ ),褐色,黄褐色,可塑~硬塑,韧性中等,干强度中等,稍有光泽,见针状孔隙,场区普遍分布,厚度0.30~2.55m,  $f_{ak} = 160$  kPa;

③层黄土( $Q_4^{pl+dl}$ ),褐黄色,可塑~硬塑,韧性中等,干强度中等,稍有光泽,见针状孔隙及钙质网膜,局部混少量姜石,粉粒含量高,场区普遍分布,厚度0.40~5.45m,  $f_{ak} = 140$  kPa;

③<sub>1</sub>层圆砾( $Q_3^{pl}$ ),灰褐色、黄褐色,稍密~中

密,湿,圆砾成分灰岩质,亚圆状,颗粒级配差,粒径0.2~2cm,含量约75%,隙间充填黄褐色粘性土,该层共做动力触探试验4段次,平均值17.1击,场区呈透镜体状分布,厚度0.40~5.45m,  $f_{ak} = 260$  kPa;

④层卵石混圆砾( $Q_3^{pl}$ ),灰色,中密~密实,湿,卵石成分灰岩质,亚圆状,少量呈次棱角状,颗粒级配较差,直径2~10cm,含量约75%~80%,隙间充填黄褐色粘性土及圆砾,圆砾含量不均,该层共做动力触探试验40段次,平均值17.3击,场区普遍分布,厚度0.20~6.55m,  $f_{ak} = 260$  kPa;

④<sub>1</sub>层胶结砾岩( $Q_3^{pl}$ ),灰色,密实,成分灰岩质,为钙质胶结,场区呈透镜体状分布于研发楼地段,厚度0.45~1.70m,  $f_{ak} = 400$  kPa;

④<sub>2</sub>层黄土( $Q_3^{pl}$ ),黄褐色,可塑~硬塑,韧性中等,干强度中等,稍有光泽,见针状孔隙及少量钙质网膜,局部混少量姜石,粉粒含量高,厚度0.40~3.60m,黄土具轻微湿陷性,  $f_{ak} = 140$  kPa,湿陷起始压力  $p_{sh} = 80$  kPa;

⑤层卵石( $Q_{2+3}^{pl}$ ),灰褐色,中密~密实,湿,卵石成分灰岩质,亚圆状,颗粒级配较差,块径一般2~12cm,最大者15cm,含量75%~90%,隙间充填红褐色粘性土,局部见块石、漂石,该层共做动力触探试验31段次,平均值19.1击,场区普遍分布,厚度1.90~8.40m,  $f_{ak} = 360$  kPa;

⑤<sub>1</sub>层粉质粘土( $Q_{2+3}^{pl}$ ),红褐色,可塑~硬塑,韧性中等,干强度中等,稍有光泽,偶见砾石,厚度0.40~2.40m,  $f_{ak} = 180$  kPa;

收稿日期:2007-04-25

**作者简介:**孙小杰(1971-),男(汉族),山东海阳人,山东省物化探勘察院高级工程师,探矿工程专业,从事软土地基处理、桩基工程和基坑支护工程施工技术管理工作,山东省济南市历山路56号, sdsj1971@yahoo.com.cn;王立新(1962-),男(汉族),山东菏泽人,山东省物化探勘察院高级工程师,探矿工程专业,从事软土地基处理、桩基工程和基坑支护工程施工管理工作;吴兆军(1961-),男(汉族),山东阳谷人,山东省物化探勘察院高级工程师,探矿工程专业,从事软土地基处理、桩基工程和基坑支护工程施工管理工作。

⑥层全风化辉长岩( $\gamma_5^3$ ),灰白色,中粗粒结构,块状构造,岩心呈砂状、土状,手捏易碎,矿物成分已风化呈高岭土状,岩心采取率 65% ~ 85%,带水钻进尺较快,该层共进行标准贯入试验 75 段次,平均击数 29.3 击,场区普遍分布,厚度 0.40 ~ 12.30 m; $f_{ak} = 350$  kPa;

⑦层强风化辉长岩( $\gamma_5^3$ ),灰白色,灰绿色,中粗粒结构,块状构造,岩心呈砂状、碎块状、块状,局部短柱状,岩心采取率约 85%,矿物成分为辉石、长石、角闪石等,该层共进行标准贯入试验 19 次,平均击数 40.6 击,场区普遍分布,厚度 0.50 ~ 13.20 m, $f_{ak} = 500$  kPa;

⑧层中风化辉长岩( $\gamma_5^3$ ),深灰色,中粗粒结构,块状构造,岩心呈柱状,柱长 5 ~ 70 cm,岩心采取率 85% 以上,RQD = 30 ~ 70,矿物成分为辉石、长石、角闪石等,该层饱和单轴抗压强度平均值 53.37 MPa,最大揭露厚度 4.5 m, $f_{ak} = 1500$  kPa。

### 3 设计方案

#### 3.1 地基基础设计方案

设计以第④层土为基础直接持力层,修正后地基承载力特征值 $f_a$ 取 360 kPa,经验算,下卧层④<sub>2</sub>强度及变形均不能满足要求。通过对比分析,采用高压喷射注浆法对其处理技术可行、经济合理。

#### 3.2 地基处理设计

##### 3.2.1 设计要求

将软弱土层④<sub>2</sub>复合地基承载力提高到 $f_{spk} \geq 220$  kPa,压缩模量 $E_s \geq 8$  MPa。

##### 3.2.2 地基处理设计计算

###### 3.2.2.1 承载力计算

采用高压旋喷桩复合地基,设计桩径为 800 mm,水泥石体 28 天抗压强度 $\geq 5$  MPa,据设计承载力要求,按照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79 - 2002)复合地基承载力特征值公式进行计算:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1 - m)f_{sk}$$

式中: $R_a$ ——单桩竖向承载力特征值,据 $R_a = \eta f_{cu} A_p$ 和 $R_a = u_p \sum q_{si} l_i + q_p A_p$ 计算取值; $m$ ——面积置换率,取桩间距 1.0 m 左右, $m \geq 45\%$ ; $f_{cu}$ ——桩身水泥石体 28 天龄期立方体试块抗压强度平均值,取 5 MPa; $\eta$ ——桩身强度折减系数,取 0.33; $l_i$ ——桩周土厚度,取平均厚度值 2.0 m; $q_{si}$ ——桩周土第  $i$  层土摩阻力特征值,据勘察报告取值 14 kPa; $q_p$ ——桩端地基土未经修正的承载力特征值,据勘察报告取 360 kPa; $A_p$ ——桩端面积,取 0.5024 m<sup>2</sup>; $\beta$ ——桩间

土折减系数,取 0.3; $f_{sk}$ ——桩间土承载力标准值,取第④<sub>2</sub>层承载力特征值 140 kPa。

通过计算, $R_a = 251.2$  kN, $f_{spk} = 248.1$  kPa $\geq 220$  kPa,满足设计要求。

##### 3.2.2.2 软弱下卧层验算

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007 - 2002)采用以下公式进行软弱下卧层验算:

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az}$$

式中: $p_z$ ——相应于荷载效应标准组合时,软弱下卧层顶面附加压力值; $p_{cz}$ ——软弱下卧层顶面处土的自重压力值,计算得 111 kPa; $f_{az}$ ——软弱下卧层顶面处经修正后的地基承载力特征值,计算得 225 kPa。

$$p_z = lb(p_k - p_c)/(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)$$

以 ZJ - 8 承台为例(见图 1), $l = 4.8$  m, $b = 4.1$  m, $p_k$ 计算得 393 kPa, $p_c$ 计算得 74 kPa, $\theta$ 取 25°, $z$ 取 2 m; $p_z = 158$  kPa; $p_z + p_{cz} = 269$  kPa $> f_{az} = 225$  kPa,软弱下卧层验算不能满足上部荷载要求。

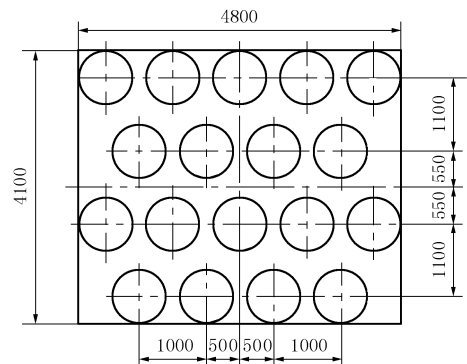


图 1 ZJ - 8 承台桩位布置示意图

### 4 施工工艺

#### 4.1 试验施工

据设计要求及场地地层条件,确定以下试喷参数:

(1)采用二重管高压喷射注浆法进行施工,选择有代表性地段①轴与 A 轴交点处 ZJ - 2 承台为试验区。

(2)注浆参数:注浆压力 30 MPa,浆量 60 ~ 70 L/min,气压 0.7 MPa,气量 1.5 m<sup>3</sup>/min,提升速度 10 cm/min,旋转速度 10 r/min,水灰比采用 1(浆液密度 1.49 kg/L),水泥采用 32.5R 普通硅酸盐水泥,注浆用水泥量取 400 kg/m(注浆量按公式 $Q = 0.785[D_{s2}K_1L_1(1 + \beta) + D_{k2}K_2L_2]$ 计算得 0.49 m<sup>3</sup>,即水泥用量 $\leq 365$  kg/m)。

(3)孔深以进入第⑤层 0.5 m 控制,喷射面提

升到进入第④层下底面 30 cm 控制。

(4)防止串孔,分 2~4 序孔组织施工。

#### 4.2 施工工艺

试验施工结束 3 天后开挖检验桩体情况,发现桩径最大 0.89 m,最小 0.78 m,桩体呈深灰色,水泥浆喷射均匀,3 天后强度用镐头难以挖掘,由设计、监理、建设和施工方四方共同确定采用试验施工参数组织施工。

施工工艺流程为:定位放线→钻进成孔→台车就位→浆液制备→下喷射管→喷射提升→移机→回灌。

##### 4.2.1 定位放线

根据设计图纸和业主提供的控制轴线,采用经纬仪定向钢卷尺量距的方法进行放线,定出每孔的孔位,并用木桩标记,确保孔位偏差 < 2 cm。

##### 4.2.2 钻进成孔

采用 XY-100 型钻机成孔,利用水平尺调整钻机水平,确保垂直度 < 1%,钻进过程中详细记录地层情况,确定出④<sub>2</sub>层和⑤<sub>1</sub>层深度,钻进至第⑤层 0.5 m 终孔。

##### 4.2.3 台车就位

成孔结束后,将台车移至孔位上,调整台车水平,使二重喷射管能够顺利自由下落至孔底。

##### 4.2.4 浆液制备

按水灰比为 1,采用二次搅拌方式进行制浆,一次搅拌采用立式搅拌机,每次加入适量的水、适量的水泥,搅拌时间 < 3 min,一次搅拌完毕后经筛网过滤后放入二次搅拌池继续搅拌,确保水泥浆搅拌均匀无沉淀;每 30 min 检测一次浆液密度,并做好记录,浆液存放时间不超过 3 h,否则作废浆处理。

##### 4.2.5 下入喷射管

边送浆边下管,直至设计深度。

##### 4.2.6 喷射提升

启动灰浆泵,待浆液返出口口后,开始旋转提升喷射,提升到第④层底面以上 30 cm 后结束喷射。

##### 4.2.7 回灌

喷射注浆结束后,由于水泥浆的析水作用,易造成高喷桩顶浆面下降,在每个孔灌浆结束后利用回浆及时进行回灌,直到浆液面不下沉为止,以确保高喷桩顶质量和设计标高。

## 5 质量检验

### 5.1 桩身水泥石土强度

施工过程中利用孔口返出的水泥浆每天制作 2 组 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 试块,标准养护

28 天后进行试验,试块无侧限抗压强度在 9.7 ~ 17.6 MPa 之间,均超过了设计强度 5 MPa。施工结束 24 天后,钻孔取心 3 根桩,水泥石土岩心颜色深灰色,均匀,切取 6 块水泥石土试块做无侧限抗压强度试验,抗压强度值在 6.1 ~ 13.3 MPa 之间,均满足了设计强度的要求。

### 5.2 开挖检验

选择 3 点不同区域开挖检验桩顶质量,发现桩径分别为 79、82、86 cm,均达到了设计及规范要求,桩体喷灰均匀,桩体呈深灰色。

### 5.3 静载试验

高压旋喷施工结束 28 天后,开挖至④<sub>2</sub>层顶部对复合地基进行了 3 组静载荷试验,加载到设计承载力的 2 倍 440 kPa,对应最终沉降量分别为 9、11.5 和 14.2 mm,均没有达到破坏,满足了设计复合地基承载力特征值 ≥ 220 kPa 要求。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)变形模量公式:

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2)pd/s$$

其中  $I_0$  取 0.785,  $\mu$  取 0.38,  $p$  取 350 kPa,  $d$  取 1.20 m,  $s$  取 5.6 mm,计算变形模量  $E_0 = 50.4$  MPa。

根据经验公式:

$$k = E_0/E_s$$

其中  $k$  取 3.0,计算压缩模量  $E_s = 16.8$  MPa ≥ 8 MPa,满足设计要求。

### 5.4 沉降观测

该项目主体已建成运行近 1 年,先后进行了 9 次沉降观测,沉降量在 0.25 ~ 4.12 mm 之间,从最后 3 次沉降数据看沉降趋于稳定,高压喷射注浆处理效果良好。

## 6 结语

工程通过采用二重管高压喷射注浆法施工,有效地提高了该厂房下卧④<sub>2</sub>和⑤<sub>1</sub>层的承载力,减少了地基土的变形,该工程的成功实践给类似工程可起到很好的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [4] GB 50021-2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [5] GB 50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [6] 编写委员会. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.