

采用高压旋喷桩处理在建沉井超沉事故

叶伟胜

(宁波市高等级公路建设指挥部,浙江 宁波 315192)

摘 要:宁波市通途路改建工程污水提升泵站的地下沉井在建过程中发生了超沉,经分析决定采用高压旋喷桩处理。对设计思路和施工方案选择进行了论述,并对其实施经验进行了总结。

关键词:沉井;超沉;高压旋喷桩;加固处理

中图分类号:TU472.3⁺6 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2004)03-0010-04

1 沉井超沉事故概述

宁波市通途路改建工程污水提升泵站工程,其地下部分采用沉井基础,内设有泵房和污水池;上部为一层砖混结构。

沉井形状为圆形,深度为 15.2 m,外径为 11.5 m,内径为 10.5 m,壁厚为 50 cm,设计刃脚高度为 2.5 m。采用自重下沉。当沉井下沉至接近设计标高时,在井内挖土,并运入块石,准备封底。由于用于垂直运输的吊车突然出现故障,导致挖土和向井内运输块石等材料的作业停止,1 h 后,沉井内土体突然大量上涌,沉井迅速下沉。此后,土体上涌达 1.5 m,沉井逐渐趋于稳定,但沉井已超沉。为此,迅速采取井内回填,平衡井外土体压力,以防沉井继续下沉。沉井情况见图 1。

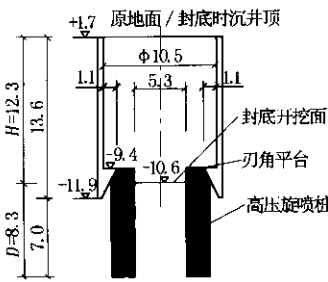


图 1 沉井示意图(单位:m)

2 地质概况

根据地质勘察报告,场区 31.4 m 深度范围内,按土层的成因类型和物理力学特征,划分为 4 个工程地质层,自上而下分别为:

①层粘土,灰黄、暗黄色,可塑,厚层状,含少量铁锰质氧化物,厚度 3.20 m。

②₋₁层淤泥质粘土,灰色,流塑,饱和,高压缩性,局部含有有机质。

②₋₂层淤泥,灰色,流塑,饱和,高压缩性,土质极差。

③层粉砂,青灰~黄灰色,稍密,下部夹少量粘土薄层,埋深 11.0~11.3 m,厚度为 1.0~2.0 m。

④₋₁层淤泥质粘土,灰色,流塑,层状,土质不均,土的物理力学特性差,沉井刃脚、底板位于该层中。

④₋₃层淤泥质亚粘土,灰色,流塑,厚层状,高压缩性,土质差,未揭穿。

各土层物理力学性质见表 1。

由表 1 可以看出,场区工程地质条件较差,对工程施工非常不利。另因涌土现象造成周边土体大量流失,局部流空塌陷,致使工程地质条件进一步恶化。

表 1 各土层物理力学性质表

地层代号	土层名称	层底标高 /m	层厚 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	天然含水量 /%	天然孔隙比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①	粘土	-1.5	3.2	20	31.8	0.89	27.0	11.6
② ₋₁	淤泥质粘土	-3.07	1.57	17.7	42.4	1.20	16.0	9.8
② ₋₂	淤泥	-9.17	6.1	17.0	55.7	1.50	17.0	9.6
③	粉砂	-10.37	1.2	19.1	26.3	0.78		
④ ₋₁	淤泥质粘土	-15.47	5.1	17.35	49.7	1.37	19.0	10.0
④ ₋₃	淤泥质亚粘土	-29.47	14.0	18.5	31.1	0.88	20.0	15.9

3 事故原因分析及处理方案的基本思路

3.1 事故原因分析

沉井在土体中,相当于一个支护结构,沉井的设计封底标高正处于淤泥质粘土层,此层土灵敏度较高,抗剪强度较低,且原设计沉井刃脚长度不足以阻止井内土体隆起。在封底前的挖土过程中,如不能及时封底,由于沉井周边土体的重力超过沉井内土体的地基承载力,将造成地基土破坏,从而发生沉井下土的流动,沉井外土体下陷、开裂,沉井内土体隆起,即发生抗隆起失效或称为负承载力失效。沉井内土体隆起到一定高度后,沉井停止下沉,土体亦停止上涌,达到极限平衡状态。

3.2 处理方案的基本思路和初步方案

为提高抗隆起安全系数,根据上海有关规范推荐的抗隆起安全系数的计算公式:

$$K_{Sl} = (\gamma_2 DN_q + cN_c) / [\gamma_1 (H + D) + q] \quad (1)$$

可知,要达到安全施工要求,必须加大支护结构的插入深度 D 或增加沉井内土体的抗剪强度 c 。本工程以加大 D 为好。

经研究,初步决定在沉井内沿刃脚打 2 排 $\Phi 1$ m 的高压旋喷桩,从而形成一个筒体,等效于加长了沉井刃脚的插入深度,以便于后续施工。

采用高压旋喷桩工艺进行处理,主要基于以下考虑:

(1) 因沉井内工作面较小(直径 10.5 m),因此必须采用较小的机械来完成地基处理。经比较,高压旋喷桩机机具小,较适合本工程工作面的要求。本工程使用的 XP30 型高压旋喷桩机施工尺寸为 $5.25 \text{ m} \times 3.2 \text{ m} \times 16.2 \text{ m}$,满足要求。

(2) 采用高压旋喷桩,可使桩相互搭接,形成筒体,阻止土体涌入。

(3) 高压旋喷桩独特的施工工艺,可使桩体的一部分伸入沉井刃脚以下,形成强度后,可使桩体支撑沉井,阻止其下沉,同时阻止井周土体向桩与刃脚之间涌出。因此外环桩位的中心必须贴近刃脚。

(4) 采用三重管工艺,使成桩桩径 $\geq 1.0 \text{ m}$ 。

4 加固处理方案设计

4.1 加固处理设计和施工目标

(1) 要求经加固处理后,在沉井封底前的井内土体开挖作业中,阻止涌土的发生,从而顺利封底。

(2) 加固施工中应控制沉井继续下沉,不使超沉量进一步增大。

4.2 插入深度数据的计算

按井内土体开挖至封底标高时的最不利状态进行计算(见图 1)。

(1) 取沉井内土体的内摩擦角 $\varphi = 10^\circ$, 根据普朗德公式,有:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 (45^\circ + \varphi/2) = 2.47$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi = 8.34$$

(2) 根据式(1),取 $\gamma_1 = \gamma_2 = 18 \text{ kN/m}^3$, $c = 19 \text{ kPa}$, $q = 0$, $H = 12.3 \text{ m}$, 则:

$$D = \frac{cN_c - K_{Sl}q - \gamma_1 HK_{Sl}}{K_{Sl}\gamma_1 - \gamma_2 N_q} = \frac{158.46 - 221.4K_{Sl}}{18K_{Sl} - 44.46} \quad (2)$$

则有:

$$K_{Sl} = 1.5 \text{ 时}, D = 9.95 \text{ m}$$

$$K_{Sl} = 1.4 \text{ 时}, D = 7.6 \text{ m}$$

$$K_{Sl} = 1.3 \text{ 时}, D = 6.14 \text{ m}$$

因井内土体已经经过扰动,强度降低,因此应取较大的安全系数。取 $D = 8.3 \text{ m}$, 即桩底距沉井底高差为 7 m。

4.3 旋喷桩所需强度验算

4.3.1 土压力计算

井内土体开挖至封底标高时,取刃脚底以下 1 m 深桩(筒)体进行土压力计算,见图 2。

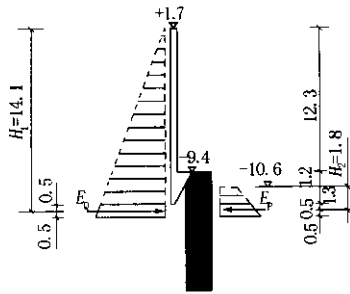


图 2 土压力计算简图(单位:m)

对圆形沉井和旋喷桩体形成的筒体,考虑井圈周边土压力的不均匀分布,假设在井圈上互成 90° 的两点处土的等代内摩擦角的差值为 5° , 即井壁一个方向 $(0, \pi)$ 为 $\varphi + 2.5$, 另一个方向 $(\pi/2, 3\pi/2)$ 为 $\varphi - 2.5$ 。按此方法计算求得的主动土压力沿筒体周边成径向分布,如图 3 所示。

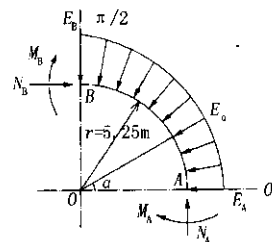


图 3 筒体周边土压力分布图

根据勘察报告,取 $\bar{\gamma}=18\text{ kN/m}^3$, $\varphi=10^\circ$, $c=19\text{ kPa}$, 且 $H_1=14.1\text{ m}$, $H_2=1.8\text{ m}$, 则筒体所受的主
动土压力计算如下(为简化计算,计算 1 m 中间处
的应力):

$$e_a^A = \bar{\gamma} H_1 K_a^A - 2c \sqrt{K_a^A} = 132.99\text{ kN/m}$$

$$e_a^B = \bar{\gamma} H_1 K_a^B - 2c \sqrt{K_a^B} = 161.88\text{ kN/m}$$

其中 $K_a^A = \text{tg}^2[45^\circ - (\varphi + 2.5^\circ)/2]$

$$K_a^B = \text{tg}^2[45^\circ - (\varphi - 2.5^\circ)/2]$$

筒体所受的被动土压力计算如下(为简化计算,
方法同上):

$$e_p = \bar{\gamma} H_2 K_p + 2c \sqrt{K_p} = 91.33\text{ kN/m}$$

其中 $K_p = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)$

则 A、B 两点的土压力为:

$$E_A = (e_a^A \times 1 - e_p \times 1) = 41.66\text{ kN}$$

$$E_B = (e_a^B \times 1 - e_p \times 1) = 70.55\text{ kN}$$

$$\omega' = \omega - 1 = 0.693, \text{ 其中 } \omega = E_B/E_A$$

4.3.2 筒体内力的计算(简图见图 3)

$$M_A = -0.1488 E_A r^2 \omega' = -118.41\text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_A = E_A r (1 + 0.7854 \omega') = 337.76\text{ kN}$$

$$M_B = 0.1366 E_A r^2 \omega' = 108.70\text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$N_B = E_A r (1 + 0.5 \omega') = 294.50\text{ kN}$$

其中 $r=5.25\text{ m}$

分别取 M_A 和 N_A 进行验算。

4.3.3 旋喷桩强度验算

在旋喷桩筒体的环向取高度为 1 m 的桩体进
行验算,见图 4,则有:

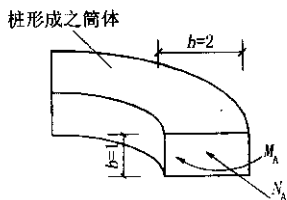


图 4 筒体应力分析简图(单位:m)

(1)在 N_A 作用下的压应力为:

$$\sigma = N_A / (bh) = 168.88\text{ kPa}$$

(2)在 M_A 作用下的最大压(拉)应力为:

$$\sigma = \pm M_A / W = \pm 177.62\text{ kPa}$$

其中 $W = bh^2/6$

则 $\sigma_{\max} = 346.50\text{ kPa}$ (压应力)

$\sigma_{\min} = -8.74\text{ kPa}$ (拉应力)

4.3.4 旋喷固结体所应达到的强度

安全系数 K 取 1.5;在粘性土中,旋喷固结体的
抗剪强度可取抗压强度的 1/10,则旋喷固结体的单
轴抗压强度 q_{cu} 应满足如下要求:

$$q_{cu} \geq 1.5 \sigma_{\max}$$

$$\text{且 } q_{cu}/10 \geq |\sigma_{\min}|$$

因此,旋喷固结体的抗压强度 $\geq 1.5\text{ MPa}$,即可
同时满足抗压、抗拉强度要求。如用标准贯入试验
检测,要求 $N_{63.5} \geq 8$ 击;如用轻便触探进行检测,要
求 $N_{10} \geq 40$ 击。

4.3.5 桩径和排数的确定

根据以上计算,确定桩径为 1 m,沿径向双排布
置,环向相互搭接 20 cm。外环为 34 根,内环为 26
根。施工后在沉井下形成一高压旋喷桩筒体。

5 施工方案和主要工艺参数的确定

5.1 施工前的准备工作

为加快进度,在水泥浆液中加早强剂(0.04%三
乙醇胺)。

地基处理前在井内填筑 2.5 m 厚粘土,可起以
下作用:(1)通过加大井内土体重力,可以平衡井外
土体压力;(2)井内土体较软弱,填土层可形成桩机
工作面。

5.2 施工顺序及监测

因成桩后初期不具强度,且强度增长亦需一段
时间,因此,在施工中,所有桩不能连续不停地进行
施工。施工中,特别是伸入刃脚底部的外环桩,应径
向跳打,尽可能拉开间距,以免刃脚桩体强度不足造
成沉井突沉;等一部分桩具有强度后,才能施工下一
批桩;桩体具有一定强度后方可进行相邻桩的施工。
施工中应加强沉降观测,根据沉降情况,随时控制桩
的施工。

5.3 桩长

按照计算要求,桩底标高应在刃脚底面以下 7
m,因成桩后桩顶部有 1~1.5 m 的浮浆,为保证桩
体有足够强度支撑沉井,因此外环桩长定为 11 m,
内环桩长定为 10.5 m。

5.4 主要施工参数

水:压力 40 MPa,流量 80~100 L/min;空气:
压力 0.7 MPa,流量 3 m³/min;浆液:水灰比 0.8,密
度 1.5 kg/L,压力 1.5~2 MPa,流量 100~150 L/
min;提升速度 8~12 cm/min;旋转速度 8~12 r/
min;水泥用量 670 kg/m。

6 加固方案实施及检测

6.1 施工机械选型

XP-30 型高架旋喷钻机;V-6/8 型空压机;
3D2-SG-85/45 型高压水泵;SGB6-10 型灌浆

泵。

6.2 旋喷桩施工顺序(见图 5)

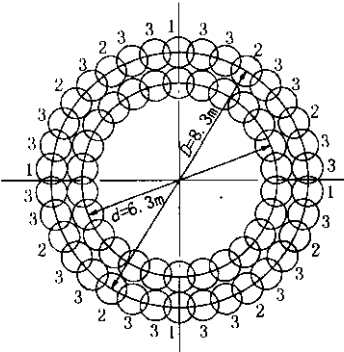


图 5 旋喷桩施工顺序简图

注:图中所注数字 1、2、3 分别表示第一、二、三批施工的桩,内环桩为第四批桩

(1)为了首先在刃脚底部形成支撑,先施工外环桩;按照径向跳打和分批施工的原则,第一批共施工 4 根桩,2 天完成,每天平均沉降为 2 mm,3 天后经轻便触探检测其中 3 根桩,均已超过 40 击/30 cm,因此决定施工第二批桩。

(2)第二批桩按跳打的原则共施工 8 根,但施工期间沉降较大,最大每天达 6 mm,最少达 2 mm,决定暂停施工。

(3)第三批桩(主要是外环余下的桩)1 天后开始施工,在最初的 4 天内施工了 9 根桩,每天沉降达 2~4 mm,连续施工 4 天;后逐渐加快速度,每天 5~8 根桩,此时沉降量已基本得到控制,因此决定进行全面施工。

(4)第四批桩(主要是内环桩)紧接第三批桩施工,每天 7~9 根桩。内环桩的施工对沉降基本没有影响。

6.3 沉降观测

旋喷桩施工过程中根据施工桩数每天用水准仪进行沉降观测。桩施工期间,总沉降量为 27 mm,时间—累计施工桩数、时间—沉降量曲线见图 6。

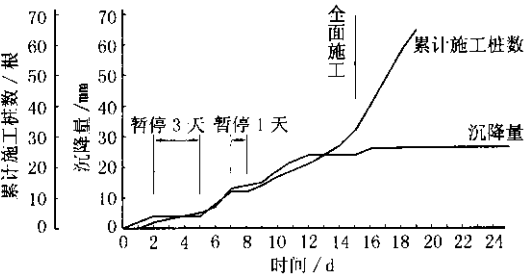


图 6 时间—累计施工桩数、时间—沉降量曲线图

6.4 成桩质量检测

桩体强度主要采用轻便触探进行检测。经检

测,桩体的强度全部合格,桩体强度与时间的关系曲线见图 7。

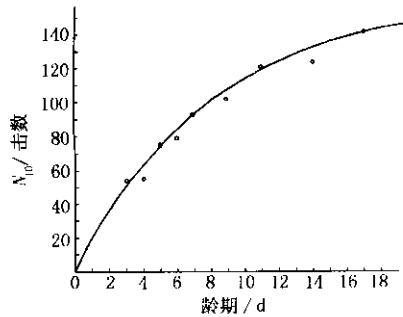


图 7 桩体强度—时间关系曲线图

桩施工结束后进行封底施工,至封底结束,沉井未出现沉降,亦未见井内涌土。

7 结论和体会

7.1 在建沉井下土体加固时的施工沉降控制措施

因对土体进行加固时,对土体本身有一定的扰动,加固形成的浆液或凝固体短期内没有强度或强度很低,如不采取措施,则会造成沉井在加固施工期间持续下沉。因此除加入早强剂提高早期强度外,在加固施工过程中,必须遵循跳打和分批施工的原则,避免对土层的持续过度扰动,并加强观测,根据沉降情况控制施工进度。

在加固施工早期(主要是外环桩),沉井的沉降与桩的累计施工数量近似成正比。这主要是由于沉井刃脚部位桩体不具有强度造成的。等一批桩的强度足以支撑沉井时,才能进行下一批桩的施工。内环桩的施工对沉井沉降没有影响。

7.2 沉井超沉时的应急措施

封底施工前应在工地内准备一定数量的块石、砂袋等材料,以免万一发生超沉时,立即进行井内回填,以控制沉井继续下沉。

7.3 沉井施工前土体的预处理

如果地质资料显示土层较软弱,可能造成沉井超沉或倾斜等情况,如对沉井封底所处土层或沉井周围土体进行预加固处理,则可避免万一出现以上事故时的被动性,减小施工难度,并相对节约造价。

参考文献:

[1] 刘惠珊.地基基础工程 283 问[M].北京:中国计划出版社,2002.
[2] 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
[3] 编写组.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.