

# 二次灌浆在电解槽沉降基础加固复位中的应用

廖培涛, 韦兴标

(广西水文地质工程地质勘察院, 广西柳州 545006)

**摘要:**广西某电解铝车间电解槽沉降基础在采用直孔帷幕灌浆加固的基础上,利用斜孔在有限空间进行二次灌浆加固复位,通过合理控制灌浆压力和灌浆量或间歇灌浆等措施,实行测量跟踪观测控制每次灌浆的抬升量,成功地将电解槽沉降基础抬升复位。

**关键词:**电解槽沉降基础;帷幕灌浆;斜孔二次灌浆;加固复位;跟踪观测

**中图分类号:**TU472 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2009)07-0053-04

**Application of Secondary Cementation in Electrolytic Cell Foundation Settlement Reinforcement and Restoration/**  
*LIAO Pei-tao, WEI Xing-biao* (Guangxi Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Liuzhou Guangxi 545006, China)

**Abstract:** Based on the straight hole curtain grouting reinforcement for an electrolytic cell foundation settlement, the second cementation was applied for reinforcement and restoration by inclined hole. By the means of reasonable control on grouting pressure & grouting amount and with the intermittent grouting technology, every lifting level was monitored and controlled; electrolytic cell foundation settlement was successfully restored.

**Key words:** electrolytic cell foundation settlement; curtain grouting; the second cementation by inclined hole; reinforcement and restoration; tracking observation

## 1 概述

广西某电解铝一期工程由电解车间、氧化铝、空压站等生产厂房组成,并于2002年底建成投产。2007年初发现一期电解厂房局部出现基础下沉和梁柱开裂等不良情况,基础最大沉降量达20 cm,并仍处于不稳定状态,必须对该厂房基础进行加固处理,以确保该厂房的安全和正常生产。我院参加由业主举行的邀请投标并中标,2007年11月进场施工,在保证该电解车间正常生产的条件下,2008年3月完成该电解厂房沉降基础灌浆加固复位施工任务,共完成灌浆孔302个,其中直孔192个,斜孔110个,累计钻灌进尺5658 m,灌浆消耗水泥约3580 t,粉煤灰约1500 t,水玻璃约200 t。该电解槽沉降基础在采用直孔帷幕灌浆加固的基础上,利用斜孔在有限空间进行二次灌浆加固复位,通过合理控制灌浆压力和灌浆量或间歇灌浆等措施,实行测量跟踪观测控制每次灌浆的抬升量,电解槽沉降基础普遍抬升10~18 cm,抬升量和平整度均满足业主及设计要求,至今该电解厂房未再发现基础沉降现象。因本次灌浆加固复位施工不影响该电解车间的正常

生产,保证了业主的生产效益,深得业主好评,同时为我院创造了良好的经济效益和社会效益。

## 2 工程概况

### 2.1 工程地质特征与水文地质条件

#### 2.1.1 场地内工程地质特征

根据工程地质勘察资料,场地内各岩土层自上而下依次为:

(1)压实碎石素填土,为新近素填土,褐灰色,干,主要由中风化泥岩组成,夹杂少量强风化泥岩和碎石,填土过程中采用分层铺垫、分层碾压,层厚20~30 cm,压实度 $\geq 94\%$ ,整体比较密实,层厚0.8~18 m不等,原地貌为东高西低的自然冲沟,土质为膨胀土,稳定性差;

(2)粘土,褐黄色,硬塑状,干,含少量砂、角砾,层厚4.0~10.3 m,粘土中可见泥岩全风化岩块,标贯锤击数 $N=15\sim 24$ 击,平均锤击数18击;

(3)残积粘土,褐黄色,局部花斑状,坚硬,层厚4.3~8.2 m,标贯锤击数 $N=20\sim 26$ 击,平均锤击数20击;

收稿日期:2009-03-08; 改回日期:2009-06-24

**作者简介:**廖培涛(1963-),男(汉族),广西荔浦人,广西水文地质工程地质勘察院副总工程师、高级工程师、注册岩土工程师,水文地质工程地质专业,从事岩土工程勘察、桩基工程、基坑支护、地质灾害勘查设计与治理等工程技术指导与施工管理工作,广西柳州市东环路12号;韦兴标(1967-),男(汉族),广西荔浦人,广西水文地质工程地质勘察院高级工程师,注册一、二级建造师,注册安全工程师,探矿工程专业,从事钻(冲)孔灌注桩、软土地基加固处理、深基坑支护、地质灾害治理等工程施工管理与技术指导工作,weixb\_110@163.com。

(4)强风化泥岩,褐黄色,黄灰色,坚硬,层厚2.4~7.2 m,标贯锤击数 $N=21\sim 66$ 击,平均锤击数36击;

(5)中风化泥岩,为第三系湖相沉积,褐灰色,硬,泥质结构,中厚层状,锤击声哑,含腕足类化石,岩体被切割成20~90 cm不等的岩块。钻探揭露厚度超过15 m,据区域地质资料,该岩层总厚 $>100$  m。

### 2.1.2 场地内水文地质条件

场地内地形标高较高,广泛出露的第三系湖相沉积泥岩为区域弱含水层,在场地内为非含水层,地下水埋深 $>30$  m。

## 2.2 电解厂房及其基础下沉情况

(1)电解厂房地质情况:厂房位于回填区(回填土最大深度约25 m),原地貌为东高西低的自然冲沟,土质为膨胀土,稳定性差。

(2)电解厂房:主厂房自西向东分别为1~95线,全长约595 m,跨度24 m,高约17 m,占地面积约 $14500\text{ m}^2$ (厂房CD轴),厂房基础下沉区域面积约 $2500\text{ m}^2$ (1~15线)。主厂房+2.50 m以下为钢筋混凝土框架结构,以上为轻钢结构,钢柱基础为人工挖孔桩,平台小柱基础为独立浅基础,电解槽及铝母线基础为筏板基础(回填区域)。

(3)下沉情况:平台、梁、柱开裂及下沉,电解槽及铝母线基础为筏板基础整体下沉,室内地坪中间部位下沉及两侧拱起,厂房局部下沉量最大达20 cm。

## 2.3 基础加固要求

(1)灌浆加固要求:该厂房轴线外3 m内机械钻孔灌浆(电解厂房CD轴1~15线,面积约 $2500\text{ m}^2$ ),达到密实、稳定,确保该厂房不再发生沉降。

(2)梁、柱加固复位要求:+2.50 m平台已开裂的梁、柱加固复位,抬高下沉平台至设计标高或最大接近设计标高,同时满足 $200\text{ kN/m}^2$ 活荷载的设计要求。

(3)施工要求:下沉基础灌浆加固施工中必须保证该电解车间的正常生产,不得影响或中断车间内正常生产运行;进行平台梁柱加固复位时,可禁止平台上任何车辆通行。

## 2.4 施工环境条件

在施工中必须保证该电解车间的正常生产,不得影响或中断车间内正常生产运行;进行平台梁柱加固复位时,可禁止平台上任何车辆通行。而电解车间内电解槽占据大量的空间,且混凝土地面(厚

20~30 cm)与该车间梁净距离约1.50 m,与平台底面净距离约2.00 m,支撑电解槽的梁和柱下为片筏基础(厚30 cm,埋深1.50 m);基础顶面至混凝土地面为分层夯实的回填土。施工环境条件狭窄,作业人员不能正常直立行走,施工设备必须进行改装后方可进行施工。

## 3 基础下沉的原因分析与加固方案的选择

### 3.1 基础下沉的原因分析

经现场踏勘和资料分析,引起该电解车间基础下沉的主要原因:基础置于回填土上,虽该回填土经分层压实,整体密实度较好,但因填料为膨胀土,在地下水或地表水作用下,吸水膨胀变软,失水收缩;同时在上部荷载作用下,使土体产生滑移或变形,这就造成该电解槽地基土承载力不足,形成了厂房中间下沉、两侧拱起的现象。

### 3.2 沉降基础加固方案的选择

(1)锚杆静压桩施工方案:因施工现场净空高度的限制,大型机械施工设备无法进场,结合我院现有技术装备和以往施工经验,可采用锚杆静压桩对其沉降基础进行托换处理,由锚杆静压桩和桩间土共同承担上层建筑物荷载,可以解决电解槽基础地基承载力不足的问题,且桩数量相对少些;但锚杆静压桩必须先清除电解槽基础上部回填土,后采用钻孔钻穿电解槽基础,且因基础厚度不足,无法提供足够的静压,锚杆静压桩嵌入深度未能满足设计要求,同时因在基础上钻孔,会对原基础进行破坏。

(2)灌浆加固复位施工方案:为确保该车间基础不再发生下沉现象,应对该基础底下回填土的空隙或孔隙进行灌浆加固处理,水泥浆液在泵压作用下,经渗透、扩散、充填等作用,充满其空隙或孔隙,排出回填土中的水和空气,并与回填土的固体颗粒固结、硬化,形成承载力高、变形小的复合地基土,共同承担建筑物上部荷载,确保车间生产安全和正常运行。考虑现场施工条件,在厂房内两侧的铝母线与桩柱基础之间布置灌浆孔(直孔),采用液压千斤顶或改半装钻机(主要是将钻塔高度降低),以满足在净空2.0 m环境下机械成孔,进行帷幕灌浆加固处理。在完成帷幕灌浆加固处理后,再在厂房轴线外3 m内布设斜孔二次灌浆孔进行灌浆加固复位。该厂房轴线外3 m内有足够的位置,可安装MGJ-50型锚杆钻机,且场地平整,钻机移动方便;但灌浆孔数量多,灌浆消耗水泥等原材料多,同时施工过程中的废浆排放困难。

综合分析,采用锚杆静压桩施工方案加固处理,需要的工程造价高,基础提供的静压不足;而采用灌浆加固复位施工方案进行加固处理,电解槽沉降地基土得到加固,处理效果明显且彻底,工程造价低,故选择后者进行加固处理。

#### 4 沉降基础灌浆加固复位施工技术

##### 4.1 灌浆加固作用机理

将配制好的浆液用泵抽吸,经灌浆胶管和灌浆管,在泵压作用下,浆液通过渗透、扩散和挤密等作用,占据受灌土体的空隙或孔隙,排出空气和水,与受灌土体的固体颗粒经凝结、硬化,形成结构稳定、强度高、压缩性小的复合地基土,共同承担建筑物及其上部荷载,确保厂房基础的稳定性。

##### 4.2 灌浆加固施工工艺流程

灌浆加固施工工艺流程:测量放孔、建立合理测量观测网→钻机设备安装、机械成孔→浆液配制→灌浆(必要时采用间歇式灌浆)→灌浆效果检测→满足设计要求→交付使用。检测如发现局部薄弱环节,采取补灌措施直到满足设计要求为止。

##### 4.3 测量放孔,建立合理的测量观测网

施工前,灌浆孔的测放由测量工程技术人员采用经纬仪和钢卷尺,或采用全站仪按照施工平面布置图要求进行,并用红油漆标志;同时在沉降厂房基础上如铝母线相应位置上设置沉降观测点,建立合理测量观测网站,为以后灌浆施工进行跟踪观测,提供必要的基础资料。

在电解车间沉降基础灌浆加固复位施工中,实行跟踪测量观测,及时为灌浆加固复位提供测量数据,指导灌浆加固复位;如发现某局部地段观测点抬升量 $\geq 15$  mm时,应当停止该地段灌浆施工,待整个沉降基础抬升量基本一致后,再进行下一次灌浆加固复位施工。每天抬升量必须控制在15 mm以内,以确保电解车间正常生产和灌浆加固复位施工安全。

##### 4.4 灌浆加固施工顺序

灌浆加固施工顺序总的原则是:先外围,后中间;先进行I序孔施工,后进行II、III序孔的施工。具体做法:先对基础沉降量大的部位进行灌浆施工,后进行基础沉降量小部位灌浆施工;对于独立沉降基础J-6,应先进行沉降量大一侧的灌浆施工,后进行沉降量小一侧的灌浆施工。先进行直孔施工,后进行斜孔施工。

##### 4.5 灌浆加固范围的确定

为减少施工材料的浪费,降低工程成本,同时又能满足设计要求,经初步计算,纵向深度范围:钻灌浆孔深度必须进入原状土1.0 m以上,上至混凝土地板底部;水平横向范围:沉降厂房区1~15线及其外围1 m范围。

##### 4.6 灌浆孔间距的确定

灌浆孔间距取决于浆液在受灌地层中扩散半径 $R$ 的大小,浆液的扩散半径 $R$ 应按式确定:

$$R = [0.565C / (\beta n \gamma)]^{1/2}$$

式中: $R$ ——浆液扩散半径; $\beta$ ——有效的充填系数, $\beta = 0.85 \sim 0.95$ ;  $n$ ——地层的孔隙率, $n = 40\%$ ;  $\gamma$ ——浆液的密度,按 $W: C = 1: 1$ 计, $\gamma = 1.518$  kg/L;  $C$ ——单位长度孔段内灌入的浆液量(以质量计)。

经初步计算,结合本工程实际(回填土)和以往施工经验,灌浆孔间距初步确定为1.5~2.0 m,实际施工应根据施工现场试验后确定,并进行相应的调整。灌浆孔布置应距离基础边约1.0 m。

##### 4.7 灌浆孔的成孔技术

(1)直孔成孔技术:混凝土地板采用 $\varnothing 91$  mm金刚石清水钻进,回填土采用75 t液压千斤顶直接将兼作灌浆管用的 $\varnothing 50$  mm内丝钻杆直接压入受灌目的层,并要求进入原状土1.0 m以上,以确保灌浆加固处理的效果。

(2)斜孔成孔技术:钻孔按设计的角度进行成孔,混凝土地板采用 $\varnothing 110$ 或 $\varnothing 91$  mm硬质合金清水钻进,回填土采用螺旋钻杆干作业成孔,如遇回填大块石时,采用水灰比为2的水泥浆钻进,严禁用清水钻进成孔。钻孔深度控制在24~26 m。

##### 4.8 灌浆加固复位施工技术

###### 4.8.1 灌浆方法的选择

(1)直孔帷幕灌浆加固:采用自下而上、分段拔管灌浆的方法。即待下一灌浆段的灌浆满足设计的灌浆量或压力后,将灌浆管拔起0.5~1.0 m后再进行该段灌浆,灌浆直到混凝土底板。

(2)斜孔二次灌浆加固复位:应根据斜孔成孔的难易程度及孔壁稳定情况而定。若成孔容易、孔壁稳定,采用自下而上、分段拔管灌浆的方法;若成孔困难、孔壁易坍塌,采用自上而下分段灌浆的方法进行,以提高成孔效率。

###### 4.8.2 灌浆压力的确定

###### 4.8.2.1 灌浆压力的选择

灌浆压力大小,主要与灌浆段底部深度、浆液扩散半径、盖板厚度和地层渗透系数等因素有关。灌

浆压力的大小理论上可按式(1)进行计算,并应通过现场试验后确定。

$$P = (1/10)\beta_c \gamma T + K\lambda h$$

式中: $P$ ——容许灌浆压力,  $10 \text{ N/cm}^2$ ;  $T$ ——覆盖层或盖板的厚度;  $\beta_c$ ——浆液粘度对水的粘度比,  $\beta_c$  值在 1~3 范围选择;  $\gamma$ ——圆砾层之上的覆盖层或盖板的容重,  $\text{t/m}^3$ ;  $K$ ——与灌浆方法有关的系数, 自下而上,  $K=0.6$ ;  $\lambda$ ——与受灌地层结构性质有关的系数, 取 0.5~1.5, 结构疏松, 渗透性强的, 取小值, 结构紧密, 渗透性差的, 取大值;  $h$ ——盖板底部至灌浆段顶部的深度,  $\text{m}$ 。

经初步计算, 灌浆压力为 0.1~0.3 MPa, 实际灌浆压力应根据具体情况作适当调整。

#### 4.8.2.2 灌浆压力控制

灌浆过程中灌浆压力控制采用逐级加压方法, 每一级浆液保持一定的压力(不宜超过设计压力), 并持续一段时间(通常为 30 min 左右)后, 改为下一级配的浆液进行灌浆, 采用控制灌浆量的方法来控制灌浆压力。当地层吸浆量接近或达到设计灌浆量时, 采用浓浆进行闭浆 30 min。灌浆过程中若遇到压力陡升或突降时, 应查明原因或排除故障后方可继续灌浆。

#### 4.8.3 灌浆量的确定

设计灌浆量  $Q$  可以按下式进行确定:

$$Q = KVn$$

式中: $V$ ——受灌地层的加固体积;  $K$ ——浆液的损耗系数; 取 1.10~1.20;  $n$ ——受灌地层的孔隙率, 取 60%;  $\beta$ ——有效充填系数, 取 0.85~0.95。

#### 4.8.4 浆液配制与原材料

##### 4.8.4.1 浆液配制

本工程施工用水泥浆液采用机械现场搅拌, 要求搅拌均匀。

(1) 钻灌用浆: 为克服钻进成孔困难, 采用水灰比为 2 的水泥浆边钻边灌, 避免采用清水钻进可能造成基础下沉。

(2) 回填灌浆: 采用水灰比为 1: (0.8~1) 的水泥浆, 必要时适当掺入速凝剂——水玻璃, 减少浆液的胶凝时间。

##### 4.8.4.2 灌浆原材料

(1) 水泥: 当地水泥厂生产的普通硅酸盐水泥, 强度等级 32.5 MPa;

(2) 粉煤灰: 当地电厂生产的粉煤灰, 粉煤灰掺量为水泥用量的 20%~30%;

(3) 水: 生产区内生活饮用水;

(4) 水玻璃: 柳州市三友化工厂生产的水玻璃, 波美度 35~40 Be、模数 2.4~3.0, 通常情况下不掺入, 特殊情况下, 水玻璃掺量约为水泥用量的 10%~30%。

##### 4.8.4.3 终灌标准

当受灌地层吸浆量满足设计灌浆量的 1.2 倍或灌浆压力达到设计灌浆压力时, 并保持 10 min; 或地表冒浆时, 应终止灌浆。

#### 4.8.5 斜孔二次灌浆加固复位施工技术

在完成直孔帷幕灌浆加固施工后, 在厂房轴线外 3 m 内布置斜孔对电解槽沉降基础进行二次灌浆加固复位。沉降基础抬升量的控制: 在斜孔二次灌浆复位施工时, 测量工程技术人员必须跟班作业, 实行测量跟踪观测, 严格控制沉降基础的抬升量, 每天的抬升量必须控制在 10~15 mm, 以避免因局部抬升量过大而造成沉降基础开裂; 累计抬升量必须控制在设计控制的范围内, 以避免发生“矫枉过正”的现象。

#### 4.8.6 施工注意事项

(1) 施工前, 必须在施工现场建立合理的测量观测网; 灌浆加固复位施工过程中, 必须实行跟踪观测。如发现基础抬高或下沉, 应及时通知当班工程技术人员, 待采取相应措施后, 才能继续进行灌浆施工。

(2) 成孔过程中, 在钻穿混凝土板后, 必须采用干作业施工, 以确保钻灌浆孔的稳定性和电解槽地基土的稳定性。

(3) 若在机械成孔中遇大块石, 采用干作业施工无法成孔或成孔无法满足设计要求时, 应该在该灌浆孔两侧 0.2~0.5 m 范围内各增加 1 个灌浆孔或采用水泥浆液作为冲洗液, 采用回转钻进工艺进行机械成孔。

(4) 成孔过程中, 应当注意观察钻孔附近情况和土质变化, 原始记录应做到及时、数据准确。

(5) 灌浆过程中, 应随时注意观察灌浆压力的变化, 并准确记录各灌浆孔段的灌浆量; 同时还应注意地表是否出现冒浆等异常情况。

(6) 钻灌浆孔必须严格按各序孔施工, 同时先施工沉降量大的部位, 以便有利于控制沉降基础的抬升量和变形量。必要时, 采取合理控制灌浆量和灌浆压力, 或者采取间歇灌浆等有效措施进行合理控制沉降基础的抬升量。

(下转第 59 页)

施工工艺流程:定位→成孔→预应力锚索制作与安放→注浆→面层喷护→腰梁安装→张拉与锁定→完成预应力锚索施工。

施工要领:(1)成孔前按照设计要求定出孔位并作出标记。(2)采用机械成孔或人工成孔。(3)制作的锚索应除油、除锈,自由段用塑料布包裹或涂抹黄油,其他应按有关技术要求进行制作,安放时应确保杆体满足设计要求。(4)浆液采用掺入2%早强剂、水灰比0.6的纯水泥浆,注浆管头部距孔底50~100 mm,二次注浆压力 $\leq 1.5$  MPa。(5)腰梁安装,连梁采用2根18-20型槽钢,应连成一体,保证整体发挥作用。(6)当水泥浆强度达到设计强度的75%时,可对锚索进行张拉。锚索张拉由一套专用设备进行,即油泵、穿心式千斤顶和锚具。锚索张拉要按规程要求分级加荷,严格遵守观测时间。张拉锁定荷载为设计拉力的50%,锁定后若发现明显预应力损失应进行补偿张拉。

#### 4 施工过程中出现的问题及解决方法

在基坑西侧超前微型桩施工完成以后,即土方开挖,开始土钉墙支护施工。按设计方案及施工要求,一切均顺利进行,经过变形观测没有发现明显的变形。在西侧第五排土钉墙施工时,因局部为粉细砂透镜体,清土锚喷时出现了一定的坍塌,对此采取了减少开挖工作面、加快锚喷施工速度等一些措施,使坍塌的地方得到了及时处理,并保证喷射面层的后面没有空洞存在。至此变形观测结果显示西侧边坡只有4 mm的变形,北侧的变形较大,约有16 mm。

#### 5 施工监测

由于影响基坑支护工程安全的不确定因素甚

多,故需采取信息化施工,对基坑施工全过程进行变形监测。

(1)根据埋设于基坑顶周边12个位移观测点的监测数据显示,向基坑内侧方向最大水平位移 $S = 18 \text{ mm} < 30 \text{ mm}$ ,满足一级基坑支护规范要求。

(2)开挖基坑底部未出现土体变形与隆起。

(3)基坑开挖作业自开始至结束,累计130天(含春节放假20天),周边道路及地下管线未发现异常情况,周围建筑物正常使用。

#### 6 结语

(1)土钉墙支护结构能有效地发挥信息化施工的优点,可以根据现场土方开挖和土钉成孔过程中发现的土体实际情况与变形观测数据及时反馈设计并调整支护设计参数和施工方案。由于土体类型多变并难以准确预测,因此土钉墙支护的这一优势使其具有相当高的安全可靠。

(2)在土钉墙基坑支护施工中,边坡浸水对边坡的稳定性危害极大,施工前应查明基坑周边上下水管道,切断可能侵蚀边坡的水源,并做好基坑周边地表水的排水工作。

(3)基坑支护完成以后,经过重载及雨季的考验,西侧边坡没有明显的变形,工作状态良好。表明土钉墙与锚索相结合的基坑支护结构设计方案是合理的、可行的。

#### 参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] CECS 96:97, 基坑土钉支护技术规程[S].
- [3] GB 50330-2002, 建筑边坡工程技术规范[S].
- [4] CECS 22:2005, 岩土锚杆(索)技术规程[S].
- [5] CECS 22:99, 土层锚杆设计与施工规范[S].

(上接第56页)

#### 5 结语

(1)本工程采用灌浆加固处理方法对沉降基础进行加固处理,圆满地完成了施工任务,成功地将沉降基础抬升10~18 cm,沉降基础抬升量和平整度满足业主设计要求。至今,该沉降基础未再发生沉降现象,彻底根治了该电解槽基础沉降。

(2)灌浆加固复位施工过程中,测量观测必须实行跟班观测,为灌浆加固复位及时提供测量观测数据,以利指导施工。

(3)在灌浆加固复位施工中,在保证工程质量的前提下,在水泥浆液中适量掺入粉煤灰,可降低工程成本。

#### 参考文献:

- [1] 李茂芳,孙钊. 大坝基础灌浆(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1987.
- [2] 韦兴标. 桩底地基灌浆加固施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(9).
- [3] 韦兴标,黄礼华. 沉降柱基灌浆加固处理和倾斜柱子纠偏扶正实践[J]. 探矿工程,2003,(2).
- [4] 韦兴标. 罗定一岑溪公路G324线砼路面沉降复位加固试验[J]. 探矿工程,2002,(1).