

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.05.008

【工程应用】

深厚回填土地基储罐群不均匀沉降 原因分析及纠偏加固处理

田龙龙¹, 梁学琴²

(1. 中国石油工程建设有限公司 北京设计分公司, 北京 100085; 2. 中铁建网络信息科技有限公司, 北京 100043)

摘要: 依托某深厚回填土地基储罐群加固和纠偏处理工程, 结合地基变形特征, 通过综合分析工程地质条件、场平回填质量和强夯处理等资料, 探讨了该地基沉降变形的原因。针对储罐环墙式柔性基础, 提出了一种高压旋喷桩帷幕结合钢花管注浆加固和顶升纠偏的处治思路, 给出设计方案、关键施工技术和信息化动态控制方法。结果表明, 地基沉降量过大和不均匀沉降与黏性素填土高压压缩性、分布不均匀性、胀缩特性以及区域地下水位的变化等因素相关。钢花管注浆加固及顶升纠偏方法的工艺特点是“围、挤、压、顶”, 先将灌浆区域围住, 再在建筑物周边插入直孔及斜孔灌浆挤密地基土, 同时通过增加上部荷载, 逐步压实地基, 最后采用控制性压力注浆顶升。结合实时监测数据阐述了劈裂加固灌浆、充水预压、顶升纠偏灌浆、稳压固结和卸荷回弹五个连续阶段的动态控制方法。

关键词: 回填土; 储罐群; 不均匀沉降; 注浆加固; 顶升纠偏

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0414-09

Analysis of differential settlement and corrective reinforcement of tanks on deep backfill soil foundation

TIAN Long-long¹, LIANG Xue-qin²

(1. China Petroleum Engineering & Construction Corp., Beijing Company, Beijing 100085, China;

2. CRCC Cyber Information Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: The reinforcement and rectification treatment of a storage tank group founded on deep backfill soil foundation is discussed in this paper. Based on the characteristics of foundation deformation, the geological conditions, and the quality of backfill soil and dynamic compaction treatment, the causes of settlement were studied. For the flexible foundation of the storage tanks with ring wall, a treatment idea of high pressure rotary-jet grouting pile curtain combined with steel pipe grouting was proposed, and the design scheme, key construction technology and dynamic information control method were given. The results show that the excessive subsidence and uneven settlement are related to factors such as the high compressibility, the uneven distribution, the expansion and shrinkage characteristics of the clay fill and the change of regional groundwater level. The technical characteristics of steel pipe grouting reinforcement and jacking correction method are ‘encircling, squeezing, pressing and roofing’. The grouting area was first surrounded, and then straight holes and inclined holes were inserted around the building to squeeze the foundation soil. At the same time, the foundation was gradually compacted by increasing the upper load. And finally the controlled pressure grouting was used to jacking. Combined with the monitoring data, the dynamic control method was expounded from five successive stages: splitting reinforcement grouting, water filling preload, lifting rectification grouting, stabilizing consolidation and unloading rebound.

Key words: fill soil; storage tank group; uneven settlement; grouting reinforcement; jacking rectification

收稿日期: 2021-11-18

作者简介: 田龙龙 (1989—), 男, 甘肃平凉人, 本科, 工程师, 主要从事石油石化行业岩土工程勘察设计工作。E-mail: 842247098@qq.com。

0 引言

储罐作为重要的存储设备,随着国内外油田地面工程、大型炼厂和储备库的大量建设,在原油、天然气、化工品和工业用水等的存储中广泛应用。单体罐的容量和几何尺寸随着建设技术水平的提高而越来越大,大规模的储罐群屡见不鲜^[1]。

储罐沉降类型包括整体均匀沉降、整体均匀倾斜、不均匀沉降、边缘沉降及局部凹陷。地基不均匀沉降是导致储罐破坏事故的主要原因,会造成罐顶扭曲变形、罐壁屈曲、檐梁的屈服等,储罐破坏所导致的经济损失不仅限于结构或地基本身,更主要的是它将引起工业生产过程的中断,同时还会对环境造成一定的影响^[2-5]。

国内学者针对特定场地、不同规模的储罐地基沉降事故进行了研究,探讨了沉降原因。例如,李明瑛^[6]对某20 000 m³储油罐倾斜原因进行了分析,主要倾斜原因是地基中存在未揭露的溶洞,加载后产生差异沉降。康杰等^[7]分析了软土地基不经过处理直接修建储罐群,充水预压过快、产生较大超孔隙水压力是储罐群地基产生不均匀沉降的主要原因。张栋材^[8]分析了某工程3 000 m³油罐产生不均匀沉降的原因主要为表层人工填土地基承载力不满足设计要求,软弱下卧层强度不够,施工场地排水不畅使地基产生浸水变形等。可以看出,储罐地基沉降与地质条件、水文条件、基础设计施工和充水试验等因素相关,但未见有针对类似本文深厚回填土地基(平均厚度16 m)储罐群地基沉降原因的研究。

建(构)筑物加固及纠偏施工方法及技术较多,主要包括迫降纠偏(掏土法、水力切割法)、顶升纠偏(千斤顶、注浆法)和综合纠偏。注浆技术在住宅、办公楼和高层建筑等采用刚性基础的建(构)筑物纠偏领域得到了广泛应用^[9-13],由于储罐基础结构多为环墙式柔性基础,刚度差,在加固纠偏过程中若选用方法不当或者施工过程中控制不当,建(构)筑物倾斜会更加严重,甚至会导致建(构)筑物底板破裂,造成严重事故,因此储罐基础纠偏常采用整体移位修复法(吊装法、气垫船移位法)、顶升调正纠偏法和掏土纠偏法,注浆技术使用较少^[14-15]。因此本文针对深厚回填土地基储罐群采用的注浆加固纠偏处治方法,对后续类似场地工程问题的处理具有重要的参考价值。

1 工程概况

1.1 工程情况

拟建工程储罐群位于云南省安宁市草铺镇,由4座1万 m²储水罐组成,分别为事故水罐A、事故水罐B、调节罐A和调节罐B。4个储罐均为钢结构固定顶罐,高度17.86 m,钢筋混凝土环墙式基础,基础持力层为强夯处理后的回填土地基,设计承载力要求大于200 kPa,压缩模量大于12 MPa。储罐环墙基础顶面标高为1 903.5 m,基础底面标高为1 902.0 m,罐区地面标高为1 903.0 m。

储罐群平面位置和各罐的沉降倾斜方向(图中箭头所示)见图1。储罐基础平面图和剖面图见图2和图3。

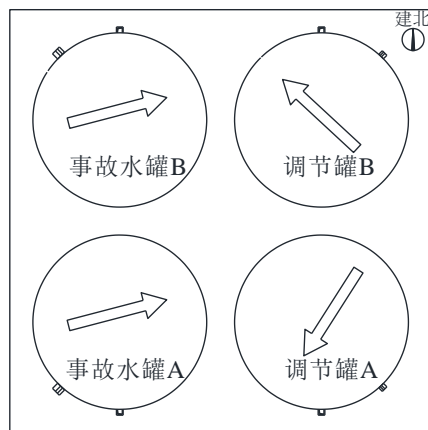


图1 储罐群平面位置示意图

Fig. 1 Location of storage tank group

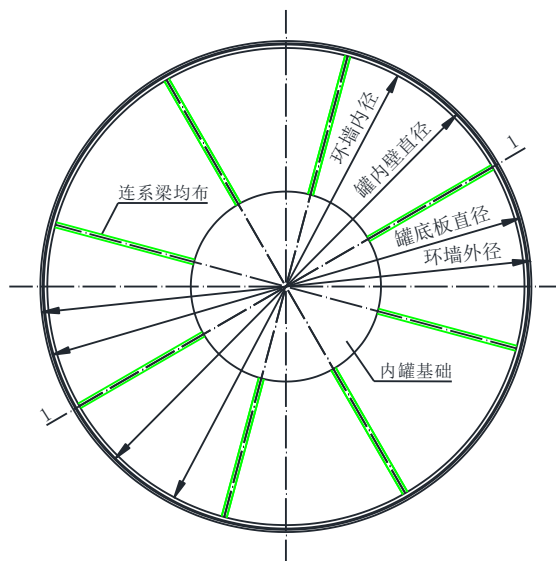


图2 储罐基础平面示意图

Fig. 2 Foundation layout of storage tank

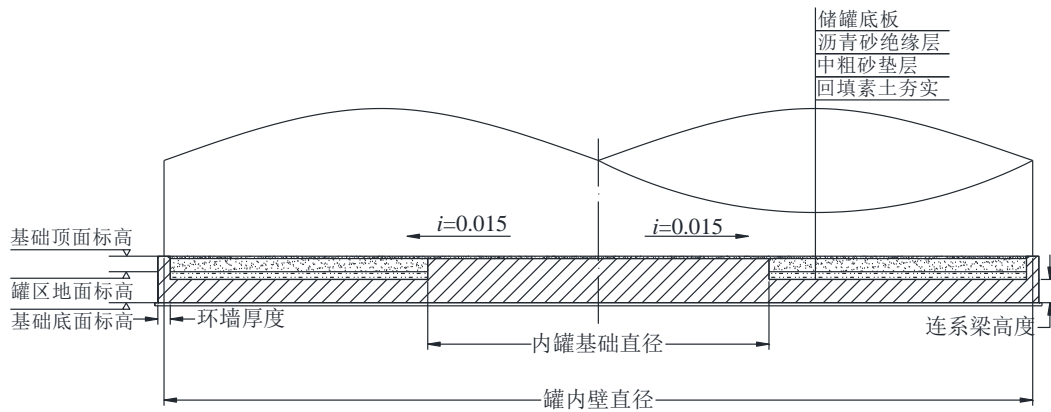


图3 储罐基础剖面图

Fig. 3 Foundation profile of storage tank

储罐设计参数：储罐结构为拱顶罐（设有内罐），容积为10 985 m³，外罐内直径为28 m，内罐内直径为11 m，罐底板直径28.14 m，环墙外直径28.4 m，环墙内直径27.6 m，储罐底板厚度为0.008 m。设备自重为3 000 kN（其中内罐重为850 kN），充水重为104 600 kN（其中内罐充水重为17 090 kN），储液面高度为16.8 m，保温重为200 kN，梯子重为62 kN。环墙基础高度1.5 m，露出地面高度为0.5 m，基础埋深为1 m。

1.2 工程地质条件

拟建工程场区位于山前平原地貌区，邻近丘陵地貌区，原始地貌为耕地、鱼塘、草地等。根据勘察资料，拟建储罐场区（30 m深度范围内）主要涉及地层包括人工堆积的素填土、第四纪冲洪积黏性土层及下伏基岩组成。典型地层剖面图如图4所示。其中，第①层素填土（Q₄^{ml}）回填土料主要来自于邻近丘陵地貌的挖方区，强夯分层压实处理，层厚13~20 m，平均厚度约为16 m。第②层粉质黏土（Q₄^{al+pl}）以可塑状态为主，局部硬塑，为中等压缩性土，层厚5~7 m。第③层含砾粉质黏土（Q₄^{al+pl}）呈可塑-硬塑状态，中等压缩性土，分布不连续，层厚1.0~3.0 m。第⑤₁层全风化泥岩、砂岩以硬塑状态为主，中等压缩性土，层厚1.0~3.0 m。第⑥₁层强风化泥岩、砂岩，呈中密-密实状态，层厚6.0~10.0 m。

1.3 地基处理及检测

各构筑物回填土厚度均大于10 m，按两层进行强夯地基处理，底层强夯至标高1 898.20 m，采用12 000 kN·m能级强夯处理，设计有效处理深度11~12 m。顶层强夯至标高1 902.20 m，采用4 000 kN·m能级强夯处理，设计有效处理深度4~6 m。

根据强夯设计，12 000 kN·m能级强夯分为5遍进行：第1、2遍采用12 000 kN·m能级平锤强夯，夯点间距10 m；第3遍为1、2遍主夯点的3 000 kN·m

能级原点加固夯；第4遍为6 000 kN·m能级平锤强夯，夯点位于主夯点中间；第5遍为2 000 kN·m能级满夯。

强夯施工完成后，底层强夯采用标贯试验、重型动探试验进行检测，顶层强夯采用静载试验、标贯、重型动探及面波测试等手段进行检测。经检测，底层及顶层强夯有效加固深度均达到设计要求，其下有效加固深度范围内均满足承载力特征值 ≥ 200 kPa、压缩模量 ≥ 12 MPa的设计要求。

1.4 施工进度及沉降观测结果

各储罐自2013年11月同时开始施工，至2014年7月主体结构施工完成，尚未进行管道、阀门等设备安装，周期9个月。主体结构施工后1个月发现储罐有较大沉降，通过在环墙周边均匀布置沉降监测点，开始连续4个月不间断的沉降观测，截止观测结束，各储罐的沉降情况见表1。沉降发生主要集中在观测的后2个月内，即工后3个月起，且各罐沉降均尚未稳定，有持续下沉的趋势，不满足设计要求，无法进入下一道工序。

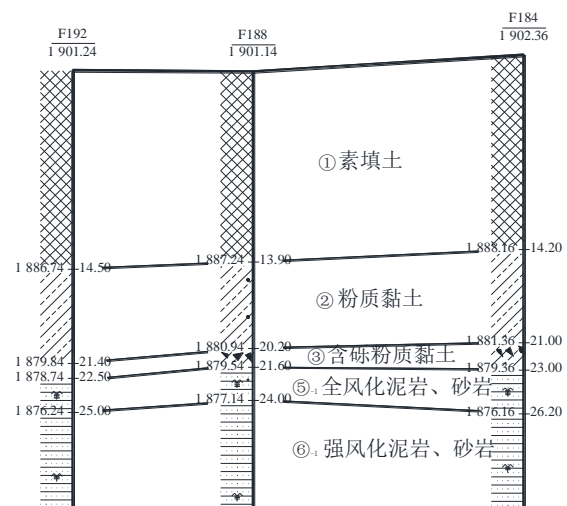


图4 典型的地层剖面

Fig. 4 Typical geology profile

表1 各储罐地基变形一览表
Table 1 Foundation deformation of tanks

| 构筑物名称 | 理论估算的地基变形/mm | | | | | | 实测地基变形/mm | | | | |
|--------|----------------|--------|-----------------|--------|------------------|--------|-------------------|-------------------|---------------|----------------------------------|---|
| | (I 阶段) 详细勘察 | | (II 阶段) 补充勘察 | | (III 阶段) 施工勘察 | | 沉降观 测点数 量/个 | 相邻观 测点间 距/m | 实测地基 变形/mm | 最大沉降差 (规范允许值 0.01D=280 mm) | 最大不均匀沉 降(规范允许 值 $\Delta_s/l \leq 0.004$) |
| | 未充水 | 满水 | 未充水 | 满水 | 未充水 | 满水 | | | | | |
| 事故水罐 A | | | | | | | 12 | 7.33 | -133~-92 | 41 | 0.005 6 |
| 事故水罐 B | | | | | | | 12 | 7.33 | -111~-2 | 109 | 0.014 9 |
| 调节罐 A | -11.5 | -169.1 | -19.2 | -315.3 | -49.0 | -756.1 | 12 | 7.43 | -79~-9 | 70 | 0.009 4 |
| 调节罐 B | | | | | | | 12 | 7.43 | -91~14 | 105 | 0.014 1 |

注: ①负值为沉降变形, 正值为隆起变形; ②地基变形允许值参照《钢制储罐地基基础设计规范》(GB 50473—2008) 要求, 其中 D 为储罐直径, Δ_s 为罐周边相邻观测点的沉降差, l 为罐周边相邻观测点的弧长。

2 沉降原因综合分析

2.1 场地回填土特性

储罐沉降前后总共进行了三阶段勘察工作, 第一阶段为 2013 年 4 月的详勘阶段(强夯处理后, 沉降前)。第二阶段为 2015 年 1 月的补充勘察阶段(沉降后)。第三阶段为 2015 年 4 月的地基加固施工勘察阶段(沉降后)。选取各阶段典型的钻孔柱状图及岩土层物理力学参数进行对比分析, 如图 5 所示。

根据勘察报告, 场平回填地基土土层以黏土、粉质黏土素填土为主, 碎石土(约占 10%)、黏性土(约占 90%)组成, 碎石母岩成分主要由整平开挖的风化基岩等组成, 粒径一般 5~30 cm, 分布不均匀, 碎石土以稍密-松散状态为主; 黏土、粉质黏土素填土含水量较大, 饱和度普遍大于 80%, 素填土压缩性高、固结时间长、不易夯实、在地下水的作用下遇水易软化且局部有膨胀性、膨胀潜势为弱、地层分布不均匀、工程性质相对较差。

沉降发生以后两阶段勘察揭示, 第① 1 层素填土分布有较多的亚层(①₁~①₄), 亚层工程性质普遍较差, 含水量明显高于详细勘察期间所测含水量, 其地基承载力及压缩模量普遍降低。主要因为素填土层成分相对杂乱、不易压实、同时易富水、在地下水的作用下易湿化变形, 导致其力学指标降低。素填土层渗透系数为 $2.48 \times 10^{-6} \sim 6.92 \times 10^{-6}$ cm/s, 为弱透水性。但是考虑到拟建场地黏土素填土胀缩性特征导致的地基土裂隙、夯填的均匀性以及回填材料粗颗粒掺料等因素的影响, 素填土仍将具有一定的透水性能, 而透水能力也会受到上述因素的影响表现出一定的不均匀性。

2.2 场地地下水影响

场区地下水主要为上层滞水, 没有统一稳定的潜水位, 水位变化大, 受季节性变化及周边补给条件的影响较大, 分布不均匀。地下水补给途径为大气降水直接入渗补给和上游边界侧向流入。拟建工程地基基础和结构施工期间, 正值当地雨季, 地基基础未施工范围及周边土层均可直接接受大气降水补给, 透过前述具有透水性能的地表土入渗, 易造成地基土特别是浅部直接持力层地基土含水量增大, 局部也可能产生上层滞水。施工当年当地年降水量相对较多, 也加大了大气降水的补给量。

2.3 地基变形分析

按照理论计算和实测的各储罐地基变形见表 1 所示。其中理论变形取三个不同勘察阶段的地层参数计算(见图 5), 按照储罐未充水(基底附加压力 15.4 kPa)和满水(基底附加压力 180 kPa)两种工况, 采用《钢制储罐地基基础设计规范》(GB 50473—2008) 中的分层综合法计算储罐中心点的沉降, 计算深度取附加应力/自重应力为 20% 所对应的深度, 考虑沉降计算经验系数的影响。可以看出, 实测储罐地基变形主要表现为沉降量过大和不均匀沉降, 其中最大不均匀沉降已超规范限值 0.004, 不满足设计要求, 无法进入下一道工序。沉降后地层参数计算的地基理论变形量和实测沉降差别较大, 原因是: (1) 理论计算采取的是罐基础中心点, 而实测点位于外围环墙基础顶面, 两者位置不同, 按储罐地基变形的特点, 储罐中心最大, 周边最小, 呈蝶形沉降^[6-17]; (2) 地基回填土层不均匀, 用代表性勘察钻孔参数进行计算, 和实际地质存在一定的差异。三个勘察阶段, 随着填土层物理力学指标的不断弱化, 地基理论变形显著增大, 因此需要进行地基加固和纠偏处理。

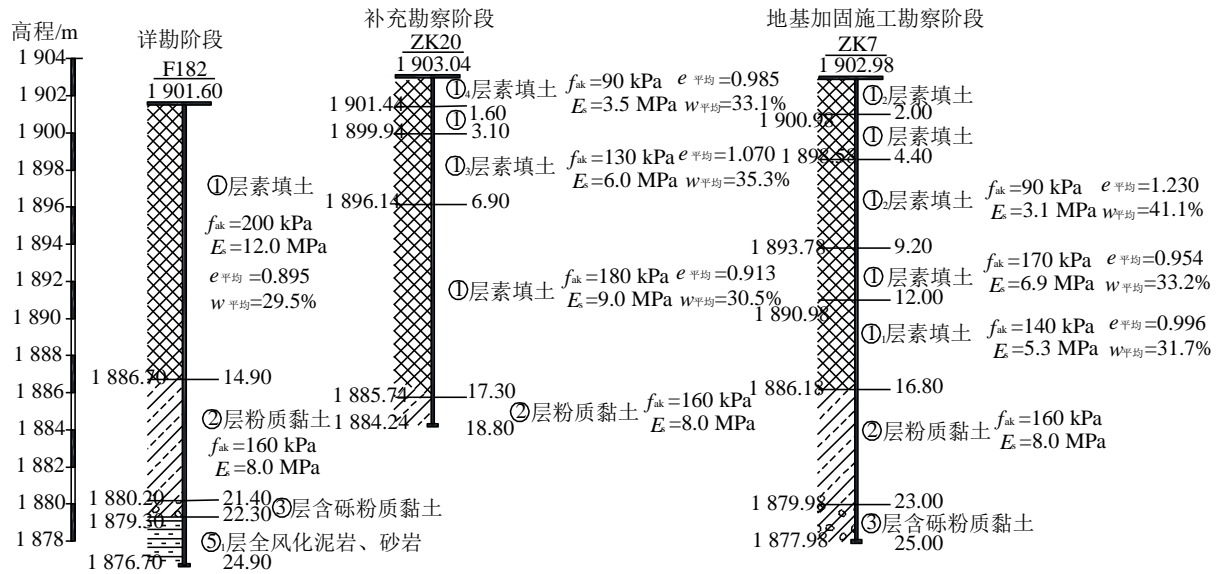


图5 各勘察阶段钻孔柱状图对比

Fig. 5 Comparison of borehole histogram in different investigation stages

3 加固纠偏方案设计

3.1 设计思路

根据现场实际情况, 构筑物主体结构已经完工, 周边管线开始布设, 且处理过程中不能对既有构筑物的结构造成破坏, 常用的换填、改良土质、桩基础的地基处理方式不能采取, 此外, 由于储罐相互间距较小, 整体沉降倾斜方向(图1)不同, 储罐纠偏常用的迫降纠偏和机械顶升纠偏无法实施。综合现场实际情况, 采用“围、挤、压、顶”的灌浆法处治思路, 即先将灌浆区域围住, 再在建筑物周边插入直孔及斜孔灌浆挤密地基土, 同时通过增加上部荷载, 逐步压实地基, 最后采用控制性压力注浆顶升, 达到基础纠偏同时加固地基的目的。治理思路如下:

在构筑物四周施做1排高压旋喷帷幕桩, 改良土体与增加抗渗能力, 有效防止构筑物形成滑动面, 防止构筑物地基发生整体剪切和局部剪切破坏。在构筑物与帷幕桩之间, 布设灌浆型钢花管微型桩, 用于防止构筑物地基发生冲剪破坏。采用钢花管全孔分段多次灌注控制灌浆法进行劈裂加固灌浆, 达到原位固结托换, 加固储罐地基土的目的。地基加固后进行储罐分级充水预压, 逐步压实储罐地基。待储罐充水预压完成后或者在储罐充水预压进行的同时, 进行顶升纠偏灌浆。纠偏成功后保持储罐充水荷载进行地基稳压固结, 待沉降稳定且满足设计要求后, 逐步排水卸荷, 全过程实时监测。

3.2 方案设计

拟建各储罐由于构造基本一致, 以事故水罐A

为例, 加固设计方案如下:

(1) 为了控制灌浆加固范围, 保证加固效果, 将储罐群外围整体施做高压旋喷注浆帷幕, 然后再针对单个储罐施做中间帷幕。高压旋喷帷幕桩设计深度20 m, 内侧离构筑物水平间距为2 m, 设计采用 $\Phi 800@600$ mm, 如图6所示。(2) 在靠近储罐基础2 m的位置施做灌浆钢花管封闭地层面体, 钢花管设计3排, 设计采用开孔直径 $\Phi 100$ mm, 排距0.6~1 m, 孔距1.5 m, 梅花式布孔; 内排孔为竖向孔, 设计长度为20 m; 中排设计为斜孔, 设计深度为斜穿构筑物基础过中心位置2 m; 外排孔采用斜孔和竖孔间隔布置, 斜孔设计深度为斜穿构筑物基础过中心位置2 m。各储罐相邻的中间区段各布设2排孔, 1排竖孔, 1排斜孔, 竖孔设计长度20 m, 斜孔设计深度为斜穿构筑物基础过中心位置2 m, 如图6和图7所示。(3) 待所有加固措施施工完毕后, 将灌浆钢花管微型桩用圈梁连接起来, 形成一个共同受力的复合地基支护体系。(4) 考虑到施工对周边构筑物的影响, 在帷幕与周边建筑物之间施做一条隔浆沟, 阻止浆液流向周边构筑物, 防止其隆起。

3.3 灌浆材料与参数选择

根据本工程特点, 采用的浆液应具有以下特性: (1) 对地基土层滞水而言, 不易溶解; (2) 对不同地层, 凝结时间可以调节; (3) 高强度、止水; (4) 在回填土和粉质黏土层可注性强; (5) 耐久性强。通过现场旋喷桩试桩和钢花管注浆试验, 结合工程地质条件, 确定了本工程的灌浆材料与施工参数。

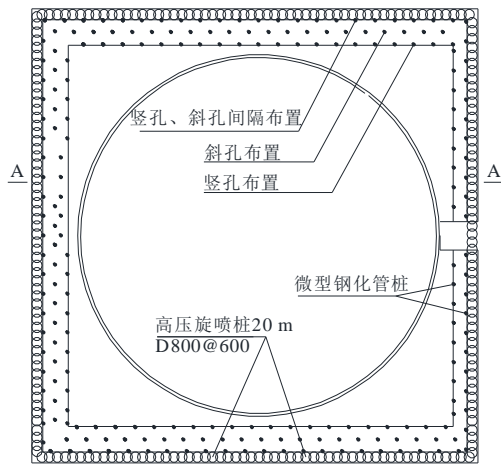


图6 储罐加固设计平面图

Fig. 6 Design plan of tank reinforcement

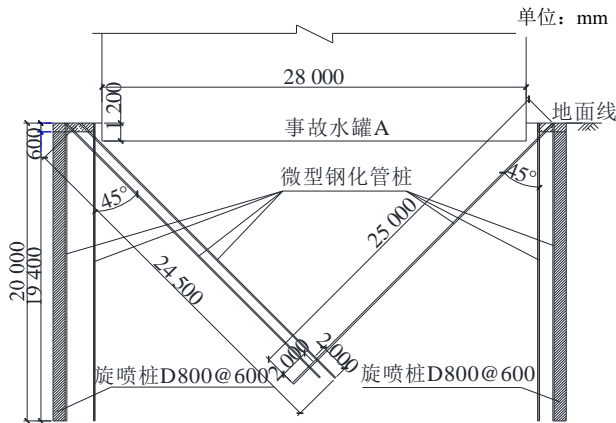


图7 储罐加固设计立面图 (A-A)

Fig. 7 Design profile of tank reinforcement (A-A)

高压旋喷桩帷幕采用 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥制备水泥浆, 水灰比 1 : 0.8~1 : 1, 采用双重管法, 注浆压力 ≥ 25 MPa, 空气压力 ≥ 0.7 MPa, 提升速度 10~25 cm/min; 劈裂加固灌浆采用单液浆, 灌浆材料为 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥, 水灰比为 0.8 : 1, 灌浆工作压力为 2.0~2.5 MPa, 灌浆终止标准为灌注量达到计算水泥用量或注浆压力超过 2.5 MPa; 灌注浆液过程中向浆液中加入膨润土或粉煤灰, 以增加浆液的流动性; 顶升纠偏灌浆采用双液浆, 灌浆材料为 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥+水玻璃, 水灰比为 0.6 : 1, 水玻璃掺入量的质量百分比为 5%~10%, 灌浆工作压力为 1.5~2.0 MPa, 当注浆压力超过 2.0 MPa 或达到纠偏设计要求时, 立即停止注浆封孔。

4 信息化施工控制

由于要保护已有构筑物的主体结构不被破坏, 同时由于地基土的不均匀性, 施工过程必须进行动

态化控制, 建立观测系统, 联合监测和劈裂加固灌浆、充水预压、顶升纠偏、稳压固结、卸荷回弹五个阶段, 进行信息化施工。

4.1 变形观测系统

利用储罐群周围的测量控制点建立平面监测网, 沿储罐环墙设置沉降观测点和水平位移观测点, 储罐周边土体进行深层土压力观测和深层水平位移(测斜)观测。储罐沉降观测点和水平位移观测点共用, 均匀设置 12 个, 深层土压力和深层水平位移按储罐群整体考虑, 场地内均布 10 个点。其中沉降观测和水平位移为主控项目, 其余项目为一般辅助项目。变形监测贯穿整个储罐地基加固及纠偏施工过程, 并延续至工后 3~6 个月, 根据监测数据, 及时调整施工参数。

4.2 劈裂加固灌浆动态控制

单个储罐的原位固结托换灌浆按照罐体圆周不同位置的沉降情况, 同时向位于储罐地基两侧的成中心对称的 3 排钢花管进行浆液的加压灌注, 要分段且进行多次。采用对角同时施工法, 相邻两孔或数孔同时进行灌注, 灌注压力要大, 供浆量要足, 以利于土体的劈裂。在加压灌注过程中对储罐地基土体变形进行实时监测, 反馈调整灌浆施工分区。劈裂加固灌浆孔施工平面次序见图 8。单个灌浆孔采用钢花管全孔分段多次灌注控制法进行劈裂灌浆, 钢花管注浆段充分结合地基土层情况和实时监测数据, 利用止浆阀动态调整注浆段。单孔灌浆施工顺序见图 9。

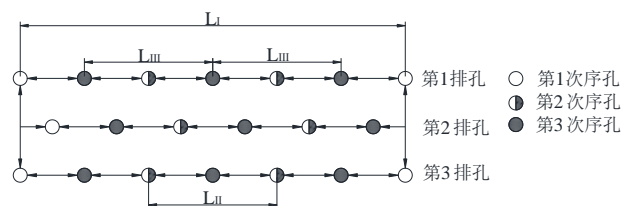


图8 劈裂灌浆孔施工平面次序图

Fig. 8 Construction sequence of fracture grouting holes

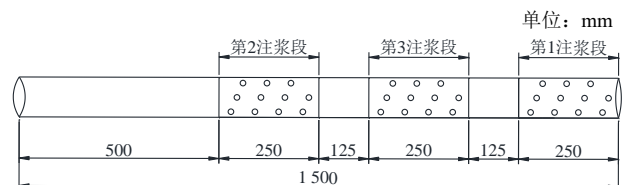


图9 单孔灌浆施工顺序图

Fig. 9 Sequence diagram of single grouting hole

对同一排上灌浆施工孔, 按 3 个次序施工, 首先钻灌第 1 次序孔, 然后钻灌第 2 次序孔, 最后钻灌第 3 次序孔。LI、LII、LIII 为第 1、2、3 次序孔

的孔距, 灌浆的施工次序就是逐渐缩小孔距, 钻孔逐渐加密, 浆液逐渐挤密充实, 可以促进灌浆帷幕的连续性; 逐渐升高灌浆压力, 有利于浆液的扩散和提高浆液结石的密实性; 根据各次序孔的单位灌入量分析, 可反映灌浆情况和灌浆质量, 为增减灌浆孔提供依据; 减少邻孔串浆现象, 有利于施工。

4.3 储罐充水预压动态控制

由于上一阶段劈裂加固灌浆使得储罐地基土体进行了加固密实, 侧向土体受高压旋喷桩帷幕和劈裂加固注浆双重加固作用, 对罐体底部土体的侧向变形进行了约束, 为使这些罐体底部的裂隙闭合, 使土体更为密实, 加快土体次固结尽早完成, 对罐体因不均匀沉降产生的偏斜进行初步纠偏, 检测劈裂灌浆加固效果, 对罐体进行分级注水预压加荷。

待储罐地基劈裂加固灌浆完成后, 连续 3 d 监测结果显示罐体沉降差异趋于稳定时, 可向罐体内充水进行预压。充水预压实施和监测执行规范《石油化工钢储罐地基充水预压监测规程》(SH/T 3123—2001)。按照地基劈裂加固阶段结束后储罐实测变形和理论分析, 结合地区经验, 罐体充水采用分级加荷的方法, 根据罐体设计最大充水量, 此次充水按 5 级进行分级充水, 依次为 1 000 t、3 000 t、5 000 t、7 000 t 和 10 000 t。每次加载后预压稳定时间不小于 24 h。

罐体注水加荷过程只是初步的注水方案, 实际做中必须重视罐体沉降速率, 以适当对充水过程参数进行调整(例如停止注水、减小充水量等)。加荷过程中应根据实测沉降速率来适当调整加荷时间长短及加荷分级, 同时根据罐体不同部位的沉降速率来补设注浆孔进行加固。若发生局部过大沉降或不均匀沉降时, 停止充水加载, 在沉降过大的区域再次进行劈裂加固注浆。加荷间隔期以罐体沉降稳定为原则来控制, 若沉降差异稳定(任意直径方向最大沉降差规范允许值 $0.01D=280$ mm, 罐周边最大不均匀沉降规范允许值 $\Delta_s/l \leq 0.004$), 则可进行下一级加荷, 如果沉降不稳定, 需根据监测数据分析后再确定下步进行卸载或注浆加固, 必须在罐体沉降差异稳定后才可进行下一步注水工作。重复此过程直到充水试验完成, 达到设计荷载。此时储罐地基沉降趋于稳定, 但尚未满足设计标高要求, 且储罐仍然存在倾斜现象, 需要进行下一步顶升纠偏灌浆。

4.4 顶升纠偏灌浆动态控制

待储罐充水预压完成后, 根据各观测点的监测数据, 通过钢花管灌浆对储罐进行多点同时灌浆顶升纠偏, 过程中通过控制注浆压力和注浆区段, 当储罐顶升纠偏达到设计要求时, 停止注浆, 封堵灌浆孔。每个注浆孔注浆完成后随即安排拔管, 以防止管孔堵塞, 一般间歇时间不超过 10 min; 当不能连续施工时, 必须立即对管道进行冲洗, 防止胶结堵管, 一般间歇时间不超过 2 h。当储罐基础开始顶升后, 应注意控制灌浆压力和灌浆量, 以防将储罐顶偏。

4.5 各阶段监测数据动态分析

以事故水罐 A 为例, 沿环墙基础均布 12 个沉降观测点, 编号 SA-1~SA-12, 通过监测环墙基础的高程变化来反映储罐的沉降情况。按照各施工阶段, 采取不同的监测频率进行连续观测, 储罐沉降变形实测曲线如图 10 所示。

第一阶段为劈裂灌浆加固阶段, 本阶段开始前储罐沉降呈现西北向东南的倾斜趋势, 西北向测点 SA-1~SA-6 沉降小于东南向测点 SA-7~SA-12。劈裂加固灌浆开始阶段, 由于地基土加固强度尚未形成, 储罐沉降速率加大, 最大沉降点为 SA-11, 沉降量为 39.4 mm, 持续两个月周期, 沉降监测频率每天 1 次。之后, 随着地基土灌浆强度的逐渐形成, 沉降速率逐渐减小, 沉降趋于稳定, 过程中受注浆压力影响, 部分观测点位置受到顶升, 沉降曲线呈不规则上下轻微波动。劈裂加固灌浆末段, 储罐地基土进一步增强, 部分测点出现较大的顶升, 此时, 这些测点对应的灌浆区段停止灌浆, 增大沉降较大侧(SA-8~SA-12)的注浆压力, 顶升储罐, 最大顶升点为 SA-11, 顶升高度 97.6 mm。从而减小储罐的整体不均匀沉降, 待沉降差异减小, 沉降稳定后停止本阶段灌浆。

第二阶段为充水预压阶段, 随着分级充水预压荷载的逐步施加, 储罐地基土受荷压实, 产生固结沉降。充水过程中针对沉降速率较大的监测点区段, 进行重复补注浆。充水试验周期 1 个月, 充水期间加强观测, 观测时间应为 2 h/次, 晚上监测时间不小于 2 次, 初次充水在上午进行。最大沉降点为 SA-4, 沉降量 49.0 mm, 最小沉降点为 SA-12, 沉降量 6.6 mm, 沉降差较大, 原因是上一阶段劈裂灌浆加固地基存在一定的不均匀性, 挤密程度不同。

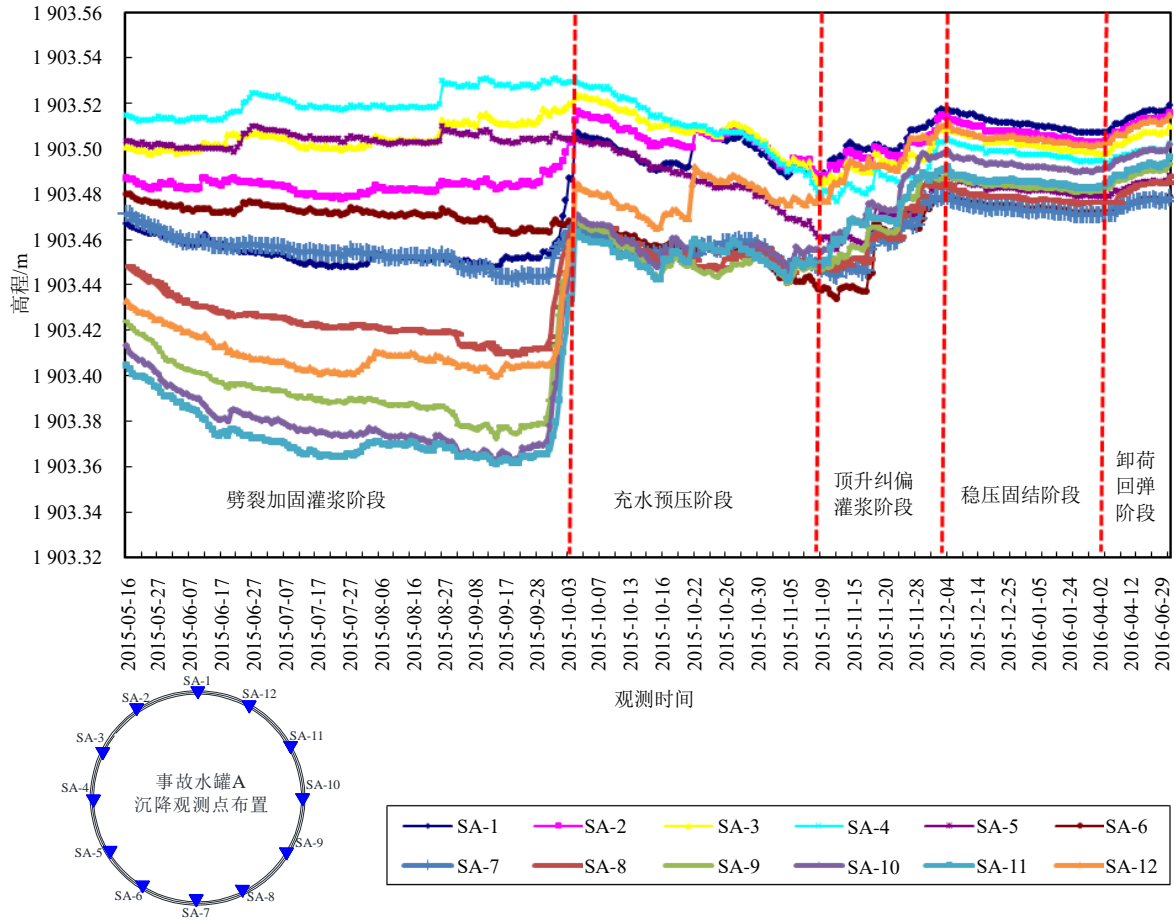


图10 事故水罐A基础高程-时间变化曲线图
 Fig. 10 Elevation-time curves of tank A foundation

第三阶段为顶升纠偏灌浆阶段，储罐地基在充水预压沉降稳定后，地基土在竖向荷载下挤压密实，具备顶升条件。顶升过程中保持储罐中的充水试验高度，从而防止储罐底板隆起和减少后期运营充水加载后的二次沉降。顶升纠偏过程主要利用注浆斜孔进行，多点对称同时注浆，按照各点的沉降大小采用差异化的注浆压力，过程中加强监测及时调整注浆压力，防止顶升过度或环墙开裂等不良后果。

顶升纠偏周期1个月，沉降监测频率每天2次，直到储罐各相邻点的不均匀沉降均满足设计和规范要求后停止灌浆。本次储罐基础的最大顶升位置为 SA-10，顶升高度 44.5 mm，最小顶升位置为 SA-4，顶升高度 24.0 mm。

第四阶段为稳压固结阶段，储罐顶升纠偏完成后，继续保持设计充水高度，稳定基底压力，使地基土完成设计荷载下的固结沉降。本阶段持续时间4个月左右，沉降监测频率2天1次，最大沉降点为 SA-3，沉降量 11.1 mm，最小沉降点为 SA-9，沉降量 5.3 mm，各点基本保持微量均匀沉降。

第五阶段为卸荷回弹阶段，充水稳压保持阶段结束后，地基土主固结沉降基本完成，此时进入充水试验卸荷阶段，分级逐步减小充水高度，直至储罐内卸荷完成。卸荷周期1个月，卸荷后持续观测周期2个月。随着荷载的逐步减小，储罐地基发生了一定程度的回弹变形，最大回弹点为 SA-2，回弹量 12.4 mm，最小回弹点为 SA-6，回弹量 6.9 mm。本阶段结束后，监测数据显示，储罐沉降和不均匀沉降均满足设计规范要求，纠偏加固达到预期效果。

5 结论

针对拟建深厚回填土地基储罐群不均匀沉降，本文通过对储罐结构和工程地质数据的分析和计算，综合探讨了不均匀沉降的原因和地基加固纠偏的处治控制方法，得到以下结论：

(1) 储罐地基沉降过大和不均匀沉降与黏性素填土厚度大、分布不均匀、压缩性高、固结时间长、不易夯实、遇水易软化等性质有关。

(2) 黏土素填土胀缩性特征导致的地基土裂隙、夯填的均匀性以及回填材料粗颗粒掺料使得其具有一定的透水性能,且透水性能表现出一定的不均匀性。加之雨季大气降水补给和上游边界侧向流入导致地基土含水量增大或形成上层滞水,导致土质软化、湿化变形、压缩性增大、承载力降低,进一步加剧了地基的不均匀沉降。

(3) 储罐地基加固纠偏采用“围、挤、压、顶”的灌浆法处治思路,即先将灌浆区域围住,再在建筑物周边插入直孔及斜孔灌浆挤密地基土,同时通过增加上部荷载,逐步压实地基,最后采用控制性压力注浆顶升,达到基础纠偏同时加固地基的目的。

(4) 储罐地基加固纠偏信息化施工控制按照劈裂加固灌浆、充水预压、顶升纠偏、稳压固结和卸荷回弹五个阶段进行,结合监测数据分析进行动态控制。结果显示,储罐沉降和不均匀沉降均满足设计规范要求,纠偏加固达到预期效果。

参考文献

- [1] 石磊, 帅健, 王晓霖, 等. 大型石油储罐地基沉降研究现状[J]. 石油工程建设, 2018, 44(1): 12-18.
SHI Lei, SHUAI Jian, WANG Xiao-lin, et al. Present status of research on foundation settlement of large-scale oil storage tank[J]. Petroleum Engineering Construction, 2018, 44(1): 12-18.
- [2] 陈凌志, 赵阳. 不均匀沉降下的大型钢储罐结构[J]. 空间结构, 2003, 9(3): 50-53.
CHEN Ling-zhi, ZHAO Yang. Large steel storage tank under differential settlement[J]. Spatial Structures, 2003, 9(3): 50-53.
- [3] WU T Y, LIU G R. Comparison of design methods for a tank-bottom annular plate and concrete ringwall[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(9): 511-517.
- [4] GODOY L A, SOSA E M. Localized support settlements of thin-walled storage tanks[J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(10): 941-955.
- [5] ZANJANI A A. Settlement criteria for steel oil storage tanks[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 13: 1-9.
- [6] 李明瑛. 某工程储罐倾斜事故的地基处理[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1): 46-50.
LI Ming-ying. Ground treatment of a tilted oil tank[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(1): 46-50.
- [7] 康杰, 徐晓红, 郭廖廊. 软土地基储罐群产生不均匀沉降原因及纠偏[J]. 炼油技术与工程, 2010, 40(10): 58-60.
KANG Jie, XU Xiao-hong, GUO Liao-lang. Analysis and correction of uneven settlement of tank group in soft soil area[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2010, 40(10): 58-60.
- [8] 张栋材. 油罐地基不均匀沉降原因分析及纠偏加固处理方法[J]. 水文地质工程地质, 2001, 5(10): 69-72.
ZHANG Dong-cai. Analysis of uneven settlement and rectification and reinforcement of tank[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 5(10): 69-72.
- [9] 汤文岗, 李晓昭, 黄慷. 注浆沉降法建筑物纠偏加固机理与关键技术研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 551-556.
TANG Wen-gang, LI Xiao-zhao, HUANG Kang. Mechanisms and key technology of rectification and reinforcement of structure by grouting[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 551-556.
- [10] 袁开军, 吴二军, 谭川龙, 等. 某高层住宅纠偏与地基加固技术[J]. 施工技术, 2016, 45(4): 118-120.
YUAN Kai-jun, WU Er-jun, TAN Chuan-long, et al. Method of rectifying and foundation reinforcement of a tall building[J]. Construction Technology, 2016, 45(4): 118-120.
- [11] 张勇, 盛宏光, 赵红玲, 等. 应用钢管微型桩对倾斜楼房进行纠偏加固[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 27(增刊 1): 3122-3126.
ZHANG Yong, SHENG Hong-guang, ZHAO Hong-ling, et al. Rectification and reinforcement of a tilted building by using micro-steel-piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 27(S1): 3122-3126.
- [12] 许庆仁. 静压注浆微型钢花管桩在高层建筑加固纠偏中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(1): 75-78.
XU Qing-ren. Application of static pressure grouting micro steel pipe pile in strengthening and deviation rectification of high-rise building[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2018, 25(1): 75-78.
- [13] 崔学栋. 步进式注浆法在某高层住宅纠偏加固工程中的应用[J]. 施工技术, 2020, 49(16): 108-111.
CUI Xue-dong. Application of stepping grouting in deviation rectifying project of a high-rise building[J]. Construction Technology, 2020, 49(16): 108-111.