

西南某炼油厂强夯法处理填土地基事故分析

孙 威, 刘金波, 张 寒, 汪 宁, 刘民易

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 对西南某炼油厂强夯法处理填土地基事故原因进行分析, 并给出处理建议。经分析, 厂区西北部填土厚度较大, 该区域内采用天然地基的建(构)筑物地基基础不均匀沉降问题较严重。地表水入渗及地下水的侧向径流补给使填土地基含水量、地下水位均有明显提高。通过对比补勘与第二次详勘期间填土的各项物理力学指标及降雨前后填土地基的载荷板试验结果可知, 厂区填土具有遇水软化的特性。地基深部存在厚薄不均的软弱下卧层, 强夯处理难以保证该层软弱土的处理效果, 不利于地基变形的稳定。建议加强地下水位、地表沉降及结构变形监测, 并根据各建(构)筑物地基基础及上部结构的变形情况, 给出合理的处理措施。

关键词: 强夯; 填土地基; 不均匀沉降; 变形监测

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)02-0023-06

作者简介: 孙威(1989-), 女, 博士研究生, 工程师, 从事地基基础及基坑工程的设计及科研工作, Email: sumabj8990@163.com。

Analysis on an accident of filled ground reinforced by dynamic compaction of an oil refinery in southwest China

SUN Wei, LIU Jin-bo, ZHANG Han, WANG Ning, LIU Min-yi

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper analyzes causes of an engineering accident of the filled ground reinforced by dynamic compaction of an oil refinery in southwest China, and also the treatment suggestions are given. It is shown that the thickness of soil in the northwestern of the plant is relatively large, and the uneven settlement of the foundation of buildings and structures with natural foundation in the area is serious. Surface water infiltration and lateral runoff recharge of groundwater have significantly improved the water content and groundwater level. Comparing physical and mechanical indexes of the fill during the supplementary survey and the second detailed survey and the load plate test results of the filling before and after the rainfall, it can be seen that the filling has the property of softening when it contacts with water. There is a weak underlying layer with uneven thickness in the deep part of the foundation. It is difficult to ensure the treatment effect of the soft soil in this layer, which is not conducive to the stability of the foundation deformation. It is recommended to strengthen the monitoring of groundwater level, ground settlement and structural deformation, and reasonable treatment measures are given according to the foundation deformation of buildings and structures.

Keywords: dynamic compaction; filled ground; uneven settlement; deformation monitoring

1 引 言

填土地基一般具有均匀性差、强度低及压缩性高等特点, 对于新填土, 在自重荷载作用下往往也会发生沉降及湿陷变形^[1], 因此需要采取地基处理措施提高地基土强度, 以满足上部结构对地基承载力及变形的要求。强夯法加固地基土的原理是利用夯锤自由下落对地基土产生的巨大冲击力, 通过动力压密或动力固结作用改善地基土的性能, 达到降低地基土压缩性, 提高地基土承载力的目的, 具有

加固效果显著、适用地基土类型多、设备操作简单及经济性高等特点^[3], 因而在地基处理工程中得到广泛应用^[3-6]。除了强夯设计参数, 如强夯能级、地基土分层厚度及夯点布置等, 场地内填土厚薄不均、填土性质的特殊性、地下水渗流条件的变化等, 均会对地基处理效果产生较大的影响。本文详细分析了西南地区某炼油厂强夯法处理填土地基

收稿日期: 2019-09-28

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0802008-02)

事故的原因,并根据各建(构)筑物地基基础及上部结构的变形情况,给出针对性的处理措施。

2 工程概况及地质条件

2.1 工程概况

我国西南某炼油厂场地长约2.4 km,宽1.1 km,位于中低山丘陵谷盆地地貌区。厂区南高北低,东高西低,高差约64.7 m。场平前,无名河是流经区域的唯一季节性河流,由炼油厂东南角向西北方向蜿蜒蛇形,纵贯建设用,从西北角流出。

2012年7月~2012年12月期间,厂区指挥部遵循挖填平衡,就近调配的原则,对场地进行了回填整平和强夯施工工作。填土的主要成分为红黏土和砂岩风化后形成的黄白色黏土,含角砾及碎石颗粒。整平后场地最高点位于炼厂东北角,高差为15.3 m。图1为场地填土厚度分布云图,场地中部为填方区,其余区域为挖方区。填土厚度自西向东、自北向南逐渐减小,位于厂区西北角的铁路装卸站及雨水收集池一带填土厚度最大,达20 m,其次为污水处理厂及硫磺回收区,最大填土厚度分别为16 m和14.5 m。

场平完成后,于2013年4月完成第二阶段详勘工作。2012年9月至2013年6月,厂区进行了强夯检测工作,强夯检测结果显示,强夯处理范围、处理后地基土承载力特征值及压缩模量基本满足设计要求。2013年3月至2014年6月厂区大部分基础施工完毕,自2014年下半年起,厂区内污水处理场、硫磺回收区、A、B、1号管廊等设施基础陆续出现较大沉降;炼厂设备区于2015年完成地面硬化;2015年、2016年由于部分装置和设备的基础陆续出现较大沉降,厂区先后分区域进行了多次补充勘察,补充勘察钻孔深度约15~20 m,并对污水处理场、硫磺回收区、A、B、1号管廊等区域陆续进行了地基加固。2017年4~6月,对硫磺回收区部分装置及周边管廊进行二次加固。

为进一步保障厂区内炼油工艺装置及相应的

油品储运、公用工程及辅助设施在投产后的地基基础安全,对该炼厂填土地基事故的原因进行分析,并给出相应的处理建议。

2.2 地质条件

地层由上而下依次为人工填土层、第四系覆盖层及基岩。第四系覆盖层主要为素填土、粉质黏土层、粗砾砂层、粉土层、中细砂层及碎石层等,局部区域存在厚薄不均的③₁含有机质黏土层,局部过渡为泥炭质土、淤泥质土,呈软塑、流塑状态,为中~高压压缩性软弱土层。场地基岩种类较多,主要为砂岩、泥岩、炭质砂岩、白云岩、灰岩、石英砂岩、砾岩、板岩等,存在溶(土)洞、红黏土、膨胀土、液化砂土等不良地质作用及特殊性土。

炼厂内第四纪地层中主要为上层滞水,地层富水性较弱,无统一稳定地下水位,受降雨影响很大。炼厂内强风化及中风化泥岩、砂岩中存在裂隙水,裂隙水水位相对较为稳定,大气降雨对其有一定的影响。炼厂内白云岩、灰岩中存在岩溶水,主要分布在炼厂东北角,地下水较稳定,除受到上层水下渗补给外,还可能受到侧向渗流补给。

场平后即进行第二阶段详勘,填土层内未见地下水。2015年底~2016年初,先后对多个区域进行了补充勘察,补勘钻孔初见水位较高,埋深基本在1 m以内,稳定水位明显高于抗浮水位设计值,其中硫磺区、雨水及污水处理厂等区域,稳定地下水位埋深5~8 m。说明在2013~2016年间地下水位有明显上升。

3 沉降发展情况

自2014年建成以外来,填土厚度较大的污水处理厂及硫磺回收区的部分设施基础陆续出现沉降及差异沉降过大的问题。沉降较大的设施多为采用天然地基上独立基础或筏板基础的钢构架、管桥和塔型建筑,目前观测到的硫磺区最大基础沉降量已达到250 mm以上。



图1 厂区填土厚度分布云图(m)

Figure 1 Nephogram of the filling thickness in the plant

污水处理厂中和池池壁开裂情况见图2, 中和池池壁伸缩缝处可以明显看到不均匀沉降引起的楼板错开。



图2 中和池池壁开裂情况

Figure 2 Cracks of neutralization pool wall

硫磺区部分钢结构与基础发生分离, 见图3。



图3 钢结构与基础分离

Figure 3 Separation of steel structure and foundation

根据2016年9月5日~2016年12月23日各区沉降观测资料, 将地表沉降绘制成云图, 见图4。

从图中可以看出, 2016年9~12月期间, 厂区填土厚度较大的西北区域地表沉降量明显大于其他区域, 硫磺回收区、延迟焦化区、污水处理区、

铁路装卸站的地面沉降发展很快, 3个月最大地表沉降达到40 mm, 挖方区及填土厚度较小的区域地表沉降量较小。

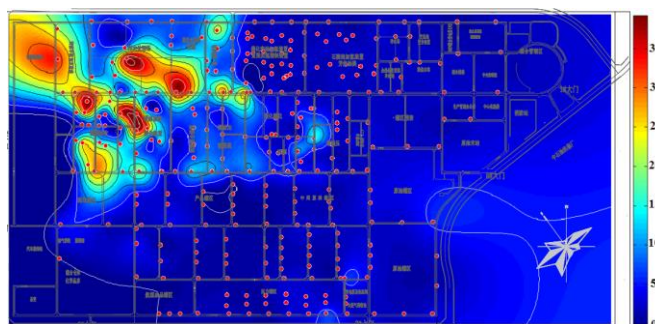


图4 地基加固前地表沉降云图 (mm)

Figure 4 Nephogram of ground settlement before reinforcement

4 填土物理力学指标变化

将补勘阶段回填土的含水量、孔隙比、干密度、动探击数、地基承载力及压缩模量, 分别与详勘阶段的对应指标进行对比, 见表1。可以看出, 与详勘阶段各项指标相比, 补勘阶段回填土含水量均有所提高, 硫磺区内填土含水量从29.4%上升到33.5%, 常减压区填土含水量从29.4%上升到35.2%, 污水处理罐区填土含水量从29.2%上升到32.4%。除了蜡油及常减压区, 其他区域的回填土孔隙比均有所升高, 其中硫磺区的孔隙比从0.87提高到0.98, 补勘阶段, 回填土干密度、动探击数、承载力特征值及压缩模量均有所下降, 部分区域的个别指标下降幅度较大。

表1 详勘、补勘阶段填土性质对比表

Table 1 Comparison of filling properties in detailed survey and supplementary survey

区域	含水量/%		孔隙比		干密度/(g/cm ³)		动探/击		承载力/kPa		压缩模量/MPa	
	详勘	补勘	详勘	补勘	详勘	补勘	详勘	补勘	详勘	补勘	详勘	补勘
硫磺	29.4	33.5	0.87	0.98	1.47	1.37	6.9	6.2	200	180	10	7
蜡油	29.7	30.7	0.90	0.91	1.46	1.43	7.0	6.1	200	160	10	5.5
制氢	24.9	31.1	0.74	0.91	1.60	1.42	6.1	7.3	210	160	10	5.3
渣油	26.8	29.9	0.79	0.89	1.54	1.45	7.5	7.1	210	160	10	6.3
常减压	29.4	35.2	0.91	0.87	1.41	1.36	7.5	6.5	188	160	5.5	5.1
罐区	29.2	32.4	0.91	1.00	1.44	1.40	8.2	5.4	200	180	10	6.9
中和池	28.5	31.8	0.90	0.98	1.44	1.42	6.8	9.0	180	160	9	6.0
再生水	27.5	30.8	0.85	0.91	1.49	1.44	6.2	6.1	200	160	10	8.0
二沉池	30.1	33.9	0.92	1.03	1.45	1.38	6.7	5.1	180	150	9	5.9
事故水池	29.4	32.3	0.89	1.01	1.44	1.38	7	5.5	200	150	8	5.9
催化联合	26.8	26.6	0.81	0.78	1.52	1.51	-	-	-	-	9.2	6.2

5 填土地基事故原因分析

5.1 外因

(1) 气象

厂区大部分建(构)筑物基础于2014年6月施工完毕,根据当地气象部门提供的资料,将炼厂所在地区近56年的年降雨量统计如图5。厂区56年间年平均降雨量为894.5 mm,最大年降雨量为1191 mm,最小年降雨量为534.2 mm,炼厂所在地区2009~2014年连续6年的年降雨量小于地区平均降雨量,2011年降雨量仅587.8 mm,2013年年降雨量仅670.5 mm。该地区每年的5~10月为雨季,约占全年降雨量的88%。

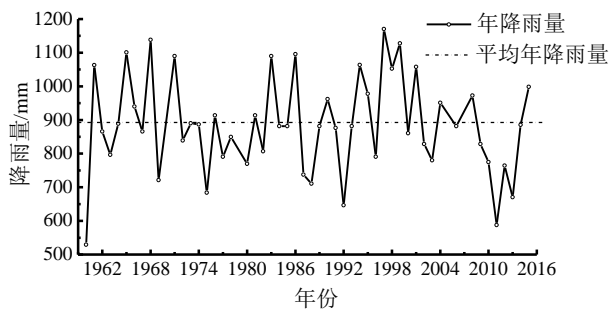


图5 1960~2015年的年降雨量变化规律

Figure 5 Variation law of the annual rainfall from 1960 to 2015

建厂期间年降雨量柱状图见图6,从图6可以看出,2014年6月~2015年5月、2015年6月~2016年5月年降雨量分别为2012年6月~2013年5月(场平及填土地基处理时期)降雨量的1.3倍,为2013年6月~2014年5月(厂区大部分建(构)筑物基础建设时期)降雨量的1.4倍。

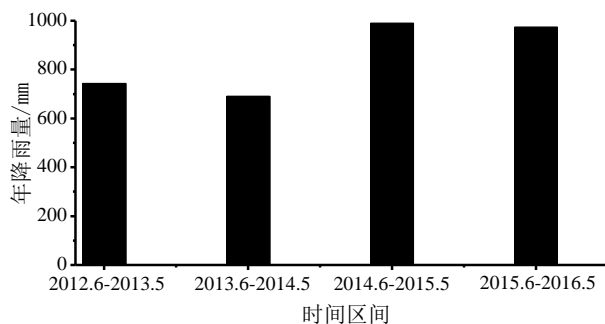


图6 2012年6月~2016年5月年降雨量直方图

Figure 6 Annual rainfall histogram from June 2012 to May 2016

2016

炼厂详勘、地基处理及强夯检测前后连续三年(2011~2013年)降雨量远低于地区年平均降雨量,可见大部分建(构)筑物建成后降雨量出现较大幅度的提高。降雨到达地面后,一部分以地表径流的方式流出,另一部分入渗地下补给地下水。强夯后炼厂内回填土松密不均,且裂隙较多,加剧了

地表水的入渗。压水试验结果显示,素填土综合渗透系数达到 1.33×10^{-3} cm/s,渗透性较强。填土下覆原状土多为黏性土层,裂隙度极低,土工试验得到的渗透系数约 $4.97 \times 10^{-8} \sim 4.80 \times 10^{-7}$ cm/s,可认为是相对隔水层。补勘期间当地降水量较大且降水频繁,钻孔初见水位为0.5~0.7 m。2016年9月2日(场地已完成地面硬化工作)对硫磺区东南区域正在进行基础加固作业,回填土内开挖0.5 m即可见积水,如图7所示。因此降雨量增加是导致填土地基含水量提高、初见水位上升的主要原因之一。



图7 建筑物基础加固

Figure 7 Reinforcement of building foundations

(2) 地下水径流

勘察报告指出,建厂前大气降雨绝大部分以面流的形式从炼厂丘陵地带汇入盆地区域,盆地区域地表水主要向无名河排泄,从炼厂东南角流入,西北角流从。炼厂外围北、东、南侧分布有4个水库,厂区地下水主要靠大气降水后周边小流域的侧向补给,降水垂直下渗补给。厂区地下水位较高的区域往往与周边水库和水塘的渗漏补给有关联。

场平工程填平了炼厂内的无名河,阻断了周边水库的排水途径。岩溶处理并场平后,厂区的地下水联通试验结果显示,注浆及场平工程在一定程度上改变了局部地下水渗流场,但区域地下水总体径流方向仍然是从东南向西北地下水侧向径流补给进一步促使厂区地下水位上升、填土含水量提高。补勘期间填土内孔隙比增加,密度减小,忽略试验精度的影响,可近似认为这是由于填土内存在竖向或水平渗流,将填土中的细小土颗粒带走引起的。基于已有的水文地质资料难以准确确定地下水的侧向径流路径及径流对炼厂水土流失的具体影响,建议做专门的水文地质勘察。

5.2 内因

场地正式强夯处理前,进行了试夯,取6号试夯区载荷试验进行分析。共布置6个载荷板检测点,见图8。

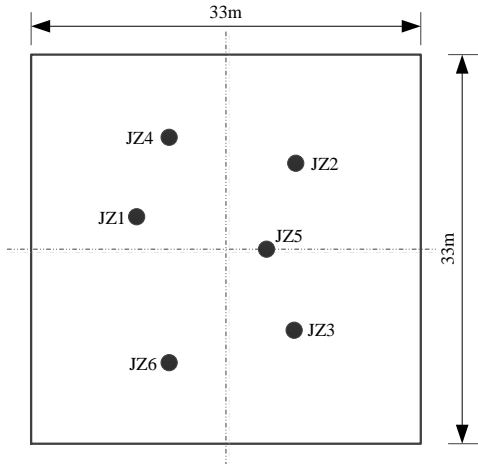


图8 6号试夯区检测点平面布置图

Figure 8 Layout plan of check points in the No.6 trial tamping area

试夯区强夯主夯击能为15000 kN m, JZ1~JZ3检测位置为夯点, JZ4~JZ6检测位置为夯间土, 其中JZ3和JZ6测点为雨后进行的检测。载荷试验检测结果见表2。可以看出, 降雨后夯点及夯间土的承载力特征值检测结果与降雨前相同, 但是降雨后最大沉降量显著大于降雨前检测结果, 接近雨前检测点最大沉降量的2倍。结合补勘阶段填土含水量升高, 且动探击数、承载力及压缩模量均有明显降低的特点, 说明了强夯处理后的地基填土具有遇水软化的特性。

表2 6号试夯区检测结果

Table 2 Testing results in the No.6 trial tamping area

测点编号	最大加载量 /kPa	最大沉降量 /mm	承载力特征值 /kPa	备注
JZ1	840	21.72	420	夯点
JZ2	840	23.48	420	夯点
JZ3	840	47.06	420	夯点(降雨)
JZ4	500	15.16	250	夯间土
JZ5	500	26.79	250	夯间土(降雨)
JZ6	500	13.52	250	夯间土

厂区强夯填料以粘性土为主, 局部填土为分布不均匀的红黏土, 具有浸水前强度高、浸水后强度急剧降低、失水易收缩等特点, 这是厂区填土地基具有雨水软化特性的内在原因。经历强降雨天气后, 雨水沿着填土裂隙不断下渗, 加上地下水的侧向径流补给, 填土地基浸水后强度及压缩模量降低, 在填土自重及上部结构荷载作用下, 填土层发生压缩变形, 使建(构)筑物基础发生沉降, 且填土厚度越大, 基础沉降及不均匀沉降问题越突出。

场地局部区域存在厚薄不均的③₁含有机质黏土层, 为中~高压缩性土, 是厂区建(构)筑物的软弱下卧层。强夯施工的加固深度难以保证该层软

弱土的处理效果, 在上部结构荷载及回填土自重作用下, 该层土极易产生压缩变形或蠕变变形, 加剧了地基的不均匀沉降。

6 处理建议

为进一步保障厂区内建(构)筑物投产后的地基基础安全, 防止地基沉降及不均匀沉降对安全生产造成影响, 建议加强对厂区室外地面、道路及建构筑物的沉降观测。应重点监测采用天然填土地基的大型构筑物、位于挖填过渡区域或回填土厚度差异较大区域的装置设备的地基基础沉降。雨季期间应适当加强观测频率。

对沉降及不均匀沉降较大的构筑物和设施, 应进行结构检测与鉴定。对整体倾斜明显、多处构件存在安全隐患的结构, 可根据生产工艺的要求, 必要时采取止倾、纠偏措施。对于沉降速率较大且未有稳定趋势的设施, 建议重新对其基础进行加固处理。对于重要的工艺管道及重点钢结构区域进行应力监测, 做好地下管线泄漏排查与监测。对于全厂未来可能发生沉降问题的装置, 建议相关生产单位结合生产工艺制定相应的应急处理措施。

厂区内装置区域应进一步做好地面硬化工作, 减小雨季地表水下渗, 防止加剧因填土地基的湿化软化引起的地基沉降问题。基于目前的水文地质资料难以准确确定地下水的侧向径流路径及径流对炼厂水土流失的具体影响, 建议做专门的水文地质勘察。当地下水渗流补给对厂区填土地基造成较大的影响时, 应采取隔水措施。持续监测厂区地下水水位, 复合抗浮设计水位, 评估厂区内埋深较大的构筑物的抗浮稳定性, 必要时采取加固措施。

7 结 语

(1) 自2014年建成以外来, 填土厚度较大的炼厂西北区地表沉降量明显大于其他填土厚度较小的填土区或挖方区, 其中污水处理厂及硫磺回收区的部分设施基础沉降及差异沉降过大问题尤为突出。沉降较大的设施多为采用天然地基上的独立基础或筏板基础的钢构架、管桥和塔型建筑, 最大基础沉降量达到250 mm以上;

(2) 炼厂详勘、地基处理及强夯检测前后连续三年降雨量远低于地区年平均降雨量, 大部分建(构)筑物基础建成至地面硬化前, 降雨量出现大幅度的提高。地表水沿着裂隙入渗使填土地基含水量增加, 此外地下水侧向径流补给也是促使填土地基含水量提高、地下水位升高的原因;

(3) 通过对比补勘与详勘期间填土的各项物理力学指标及降雨前后填土地基的载荷板试验结果可知, 厂区填土地基具有遇水软化的特性, 随着含水量的提高, 地基土强度及压缩模量均呈明显降低, 在上部结构荷载及填土自重作用下, 局部建(构)筑物基础产生较大的沉降及不均匀沉降;

(4) 局部区域存在厚薄不均的软弱土, 强夯法加固深度难以保证该层软弱土的处理效果, 在上部结构荷载及回填土自重作用下, 该层土极易产生压缩变形, 加剧了地基的不均匀沉降;

(5) 为进一步保障厂区内建(构)筑物投产后的地基基础安全, 防止地基沉降及不均匀沉降对安全生产造成影响, 提出了相关建议, 如加强沉降及变形监测, 必要时进行结构检测鉴定等;

(6) 采用强夯法进行地基处理时, 建议在进进行地基处理效果检测时, 增加浸水条件下地基承载力及地基土力学性质指标的试验, 评估含水量或地下水水位上升对填土地基的影响。当填土地基雨水强

度或压缩模量显著降低时, 建议采用复合地基(如CFG)进行二次处理, 必要时采用桩基础。

参考文献:

- [1] 化建新, 郑建国. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 2018.
- [2] JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 张忠苗, 张乾青, 王华强. 浙江某工业园区强夯法处理地基的事故分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 3217-3223.
- [4] 肖婧. 强夯法地基处理在工程实践中的具体应用[J]. 长沙大学学报(自然科学版), 2006, 20(5): 22-24.
- [5] 苏冰. 洛阳石化总厂化纤工程 4.6 万 m² 地基强夯处理[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 221-226.
- [6] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软黏土地基的理论研究与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.