

# 某一体化厌氧发酵罐地基基础沉降分析

张雪婵<sup>1,2,3</sup>, 李冰<sup>1,2,3</sup>, 王曙光<sup>1,2,3</sup>

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013;  
3. 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京 100013)

**摘要:** 为保障厌氧发酵罐的安全运行, 分别采用规范推荐的分层总和法和有限元分析模型进行发酵罐基础沉降安全评价。以单罐分层总和法平均沉降为依据, 调整有限元模型参数, 建立考虑不同土层条件影响的多罐体三维有限元分析模型。经有限元分析发酵罐基础沉降满足设计要求, 最后对发酵罐基础设计和施工提出了建议。

**关键词:** 厌氧发酵罐; 基础沉降; 有限元

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)04-0290-05

## Foundation settlement analysis of the integrated agitating anaerobic fermentation tank

ZHANG Xue-chan<sup>1,2,3</sup>, LI Bing<sup>1,2,3</sup>, WANG Shu-guang<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China;

2. National Engineering Research Center Of Building Technology, Beijing 100013, China;

3. Institute of Foundation Engineering China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety and stability operation of the integrated agitating anaerobic fermentation tank, safety assessment was made for foundation settlement by using the layer-wise summation method and the finite element method. Based on the average settlement of the layer-wise summation method, the parameters of the finite element model were adjusted to establish a three-dimensional finite element analysis model of multiple fermentation tank considering the influence of complex soil conditions. After finite element analysis, the foundation settlement of the agitating anaerobic fermentation tank meets the design requirements. Lastly, suggestions are made for the design and construction of the integrated agitating anaerobic fermentation tank foundation.

**Key words:** agitating anaerobic fermentation tank; foundation settlement; finite element analysis

## 0 引言

随着环境污染加重和能源紧缺, 可再生清洁能源的开发利用成了当今世界发展的趋势, 通过厌氧发酵技术处理农业废弃物, 不仅可以解决环境污染问题, 还可以产生清洁可再生的能源, 越来越得到重视<sup>[1]</sup>。

厌氧发酵生物发电工程离不开厌氧发酵罐, 发酵罐是一种特种结构, 具有直径大, 地基附加应力大的特点, 容易产生较大沉降和不均匀沉降。一些学者<sup>[2]</sup>对油罐地基产生不均匀沉降原因进行分析并对纠偏方法进行过探讨。还有些学者对油罐地基沉

降进行过有限元分析<sup>[3-4]</sup>, 专门针对厌氧发酵罐地基基础沉降分析研究较少。

本文针对某生物发电工程场地内 8 个一体化厌氧发酵罐基础, 以规范分层总和法计算的平均沉降为依据, 调整有限元计算参数, 考虑地质条件的差异和多个罐体相互影响建立多罐体三维有限元模型, 对发酵罐地基基础沉降进行分析。

## 1 工程概况

某生物发电工程位于内蒙古自治区, 场地内主要建筑物有秸秆堆场、水解池、收集池、匀浆池、

一体化发酵罐、厂房等。场地内一体化厌氧发酵罐共有 8 个, 平面布置如图 1 所示, 筏板基础, 地上一层, 罐体高度为 8.4 m, 罐体直径 31.32 m, 基础板直径 32.82 m, 单罐满罐含物料总重量为 5 930 t。

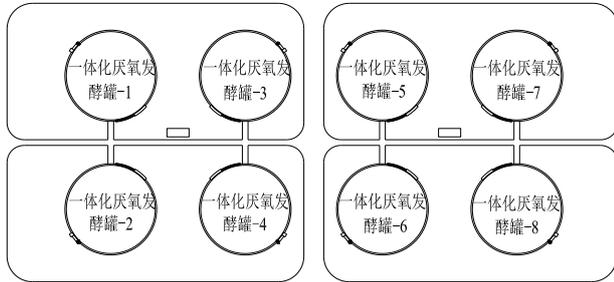


图1 一体化厌氧发酵罐平面布置图

Fig. 1 Layout plan of integrated agitating anaerobic fermentation tank

一体化厌氧发酵罐所在场地土层自上而下依次为: ①杂填土, ②粉砂, ②<sub>1</sub>粉质黏土, ④粉质黏土, ④<sub>1</sub>粉砂, ⑤粉质黏土, ⑤<sub>1</sub>泥炭质土, ⑤<sub>2</sub>粉砂, ⑦细砂, ⑧细砂。勘察期间地下水水位标高为 171.51 m。典型地质剖面如图 2 所示, 地基土物理力学参数见表 1。

8 个罐体处在同一地貌单元, 场地地势较平坦, 地层结构也基本一致, 地层分布较连续, 以砂土为主, 层差不大, 具水平层理。基础埋深暂按 1.50 m 考虑, 基础持力层为②<sub>1</sub>粉质黏土层, 分布均匀, 地基承载力特征值为 100 kPa, 根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011) [5]对地基基础进行承载力验算, 承载力满足设计要求, 综合考虑, 建议采用天然地基方案。

由于场地①层杂填土较厚, 土质较差, 分布较广, 若基础开挖至基础底面后, 基底仍有杂填土, 须把杂填土全部挖除, 并用级配砂石换填, 保证基

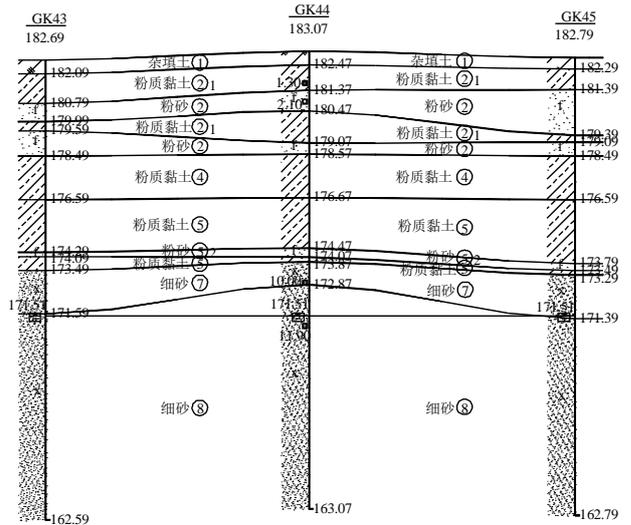


图2 典型地质剖面

Fig. 2 Typical geological section

础底面全部落在②<sub>1</sub>层或级配砂石换填层上。

场地后期地面标高 183.70 m, 如基础设置后再将场地回填到设计标高, 则新填土将对发酵罐产生附加应力, 引起发酵罐沉降及倾斜, 建议先将场地回填至设计标高, 并对回填土进行压实处理后, 再进行基础开挖。

## 2 油罐基础沉降分层总和与分析

场地 8 个一体化厌氧发酵罐勘探孔平面布置图见图 3。

根据已有设计条件, 单罐满罐含物料总重量为 59 300 kN, 基础直径为 32.82 m, 基础埋深按 1.50 m 考虑, 基底以上土层的天然重度按 16.5 kN/m<sup>3</sup> 考虑, 基础及其上土的平均重度为 23 kN/m<sup>3</sup> 考虑, 计算基础底面处附加压力约为 80 kPa。

表1 地基土物理力学参数

Tab. 1 Physico-mechanical parameters for soil layers

岩土编号	岩土名称	质量密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	天然孔隙比/ $e$	快剪黏聚力 $c_q/\text{kPa}$	快剪摩擦角 $\Phi_q/^\circ$
②	粉砂	1.65	6.1	0.8	0	24
② <sub>1</sub>	粉质黏土	1.87	5.45	0.898	26.1	11.2
④	粉质黏土	1.71	3.78	1.286	20.4	7.2
④ <sub>1</sub>	粉砂	1.67	6.7	0.8	0	24
⑤	粉质黏土	1.87	6.27	0.915	22.9	7.8
⑤ <sub>1</sub>	泥炭质土	1.52	3.58	2.269	15	9
⑤ <sub>2</sub>	粉砂	1.67	6.8	0.8	0	24
⑦	细砂	1.96	11.5	0.6	0	26
⑧	细砂	1.96	12.4	0.6	0	26

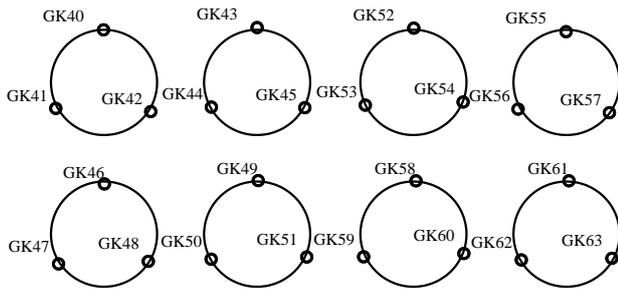


图3 勘探孔平面布置图

Fig. 3 Layout plan of exploratory boreholes

根据《钢制储罐地基基础设计规范》(GB 50473-2008)<sup>[6]</sup>中 6.2.2 条及 6.2.3 条,地基变形计算深度取 22 m,按分层总和法并考虑沉降计算经验系数,计算各发酵罐地基沉降量见表 2。

表2 单罐沉降量

Tab. 2 Settlement of the fermentation tank

编号	钻孔孔号	单罐沉降量 $s/\text{mm}$
发酵罐 01	GK41	129
发酵罐 02	GK46	118
发酵罐 03	GK44	136
发酵罐 04	GK49	125
发酵罐 05	GK53	136
发酵罐 06	GK60	154
发酵罐 07	GK56	146
发酵罐 08	GK61	150

### 3 油罐基础沉降有限元分析

#### 3.1 计算模型及参数选取

##### (1) 有限元模型

本项目的复杂性在于每个储罐下部土层情况有差别,且存在多个相邻油罐,因此常规的设计方案无法满足要求。为了更好地分析土层厚度有差异条件下,多个油罐的基础沉降,采用 Plaxis 软件(版本 Plaxis 3D 2018)根据目前拥有的地勘资料及相关信息建立储罐基础三维有限元模型,对罐区的地基变形进行计算分析。

土体本构采用摩尔库伦(MC)模型,该模型总共需要 5 个参数。每个罐下有 3 个钻孔,建模时每个罐下地层情况按地勘情况设置。

本次分析基础示意图如图 4 所示。基础板采用 0.5 m 厚 C30 混凝土板,环梁计算采用 0.55 m 厚的混凝土环梁,顶板采用 0.2 m 厚 C30 混凝土板,基础板、顶板和环梁都用线弹性板单元进行模拟。基础板及环梁与土之间的接触采用 Goodman 单元模拟墙土接触问题,切线方向服从 Mohr-Coulomb 破

坏准则。由于接触面的强度参数一般要低于与其相连的土体的强度参数,考虑用一个折减系数  $R_{\text{inter}}$  来描述接触面强度参数与所在土层的摩擦角和黏聚力之间的关系,该系数与土层性质及接触面光滑程度有关。

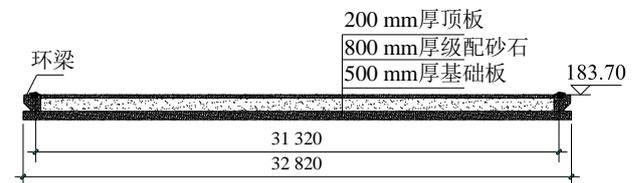


图4 基础示意图

Fig. 4 Schematic diagram of foundation

为消除边界条件对计算的影响,本次计算侧向边界取距离基础边缘 1 倍的基础直径,土层厚度取 22 m,假定 22 m 以下的土层产生的压缩可忽略不计。模型底部固定水平和竖向位移,模型侧面固定水平位移。

单罐满罐重量含物料总重量约为 5 930 t,按基础板面积换算面荷载为 70 kPa。

##### (2) 结构参数

环梁、底板和顶板采用 C30 混凝土,采用板单元模拟。计算参数分别如表 3 所示。

表3 结构计算参数

Tab. 3 Parameters of structure calculation

结构	材料	弹性模量 $E/\text{kPa}$	厚度 $d/\text{m}$	泊松比 $\nu$
基础板	C30	$3 \times 10^7$	0.5	0.15
顶板	C30	$3 \times 10^7$	0.2	0.15
环梁	C30	$3 \times 10^7$	0.55	0.15

##### (3) 土体参数

根据本场地工程地质条件,对土层及级配砂石采用 MC 模型进行分析。

MC 模型是一种弹-理想塑性模型,它综合了虎克定律和 Coulomb 破坏准则。MC 模型有 5 个参数,即控制弹性行为的 2 个参数:弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  及控制塑性行为的 3 个参数:有效黏聚力  $c$ 、有效内摩擦角  $\varphi$  和剪胀角  $\psi$ ,模型参数物理意义及确定方法可参看程序用户手册及相关文献。MC 模型采用了弹塑性理论,相对于弹性模型而言具有质的飞跃,是岩土工程中应用得最多的模型。

因地勘未给有效黏聚力  $c$ 、有效内摩擦角  $\varphi$  和剪胀角  $\psi$ ,本次计算黏聚力与内摩擦角取地勘报告中给出的快剪指标,见表 1,级配砂石有效黏聚力  $c$  取 0,有效内摩擦角  $\varphi$  取  $30^\circ$ ,剪胀角均取 0。土体的弹性模量为杨氏模量,因地勘报告未给出,

本次计算采用与压缩模量的比例关系确定, 土体的泊松比按照土层性质按经验确定, 各土层计算参数如下表 4。

表4 摩尔库伦模型计算参数  
Tab. 4 Parameters of Mohr-Coulomb model

土层名称	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
①填土	7.00	0.30
②粉砂	8.54	0.25
② <sub>1</sub> 粉质黏土	7.63	0.30
④粉质黏土	5.29	0.35
④ <sub>1</sub> 粉砂	9.38	0.25
⑤粉质黏土	8.78	0.30
⑤ <sub>1</sub> 泥炭质土	5.01	0.40
⑤ <sub>2</sub> 粉砂	9.52	0.25
⑦细砂	16.10	0.25
⑧细砂	17.36	0.25
级配砂石	35.00	0.20

### 3.2 模型验证

选用 1 号发酵罐下 GK41 号勘探孔对上述土体及结构参数进行验证, 其有限元模型及网格划分如图 5 所示。

基础板沉降如图 6 所示, 有限元计算的基础板平均沉降 129 mm, 与分层总和法计算的 1 号罐沉降 129 mm 一致, 说明模型参数选取合理。

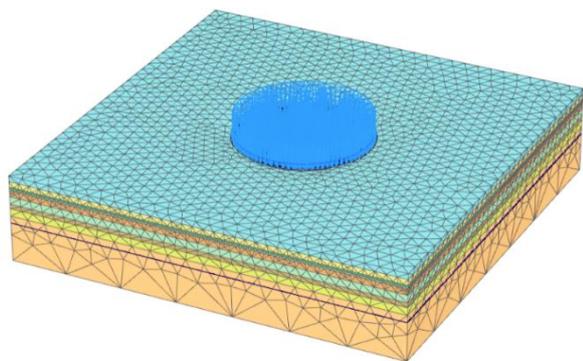


图5 三维有限元模型

Fig. 5 3D finite element model



总位移  $U_z$  (放大 20.0 倍)

最大值 = -0.1108 m (单元 1 149 在节点 44 829)  
最小值 = -0.1485 m (单元 1 656 在节点 34 990)

图6 基础板沉降

Fig. 6 Settlement of foundation plate

### 3.3 周边罐体对罐基础沉降的影响

以 6 号发酵罐为例, 分别建单独考虑 6 号发酵罐和考虑周边罐体对 6 号发酵罐影响的三维有限元模型。

通过有限元分析发现, 不考虑周边罐体影响时, 6 号罐最小沉降 112 mm、最大沉降 158 mm、平均沉降 137 mm, 考虑周边罐体影响时, 6 号罐最小沉降 122 mm、最大沉降 172 mm、平均沉降 150 mm, 周边罐体的存在会对罐体沉降产生一定的影响。

### 3.4 计算结果汇总

对每个发酵罐分别考虑地层情况和周边罐体影响建立有限元模型, 分析基础沉降, 并计算 8 个一体化厌氧发酵罐沿直径方向整体倾斜及罐周边不均匀沉降, 将结果汇总于表 5,  $D$  为油罐直径。

根据《钢制储罐地基基础设计规范》(GB 50473-2008)<sup>[6]</sup>对发酵罐变形的要求, 本项目地基变形应满足下列要求:

- (1) 任意直径方向的整体倾斜不大于  $0.005 D$ ;
- (2) 罐周边不均匀沉降,  $s/L$  不大于  $0.0025$ ;
- (3) 基础最终沉降量按不大于 200 mm 控制。

由表 5 可知, 本项目 8 个发酵罐变形均满足要求。

## 4 结论和建议

### 4.1 结论

本项目对厌氧发酵罐地基基础承载力进行了验算并给出了基础形式建议, 以分层总和法和三维有限元分别对 8 个一体化厌氧发酵罐进行了沉降计算, 得出以下结论:

- (1) 建议基础埋置深度为 1.50 m;
- (2) 本项目考虑 1.5 m 深度修正后地基承载力满足设计要求, 可以采用天然地基;
- (3) 任意直径方向的整体倾斜不大于  $0.005 D$ ;
- (4) 罐周边不均匀沉降,  $s/L$  不大于  $0.0025$ ;
- (5) 基础最终沉降量不大于 200 mm。

### 4.2 建议

(1) 罐基础采用天然地基方案时, 地基承载力计算考虑深度修正影响方可满足要求, 建议场地须平整至 183.700 m 标高后再进行基坑开挖, 且平整场地需碾压密实, 满足相关规范及设计要求。

(2) 基础开挖过程中, 若基槽底部存在杂填土、软弱土等不符合设计要求的情况, 应采用换填法回填级配砂石处理。若基槽边缘存在杂填土或软弱土时, 应根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)<sup>[7]</sup>中换填材料的压力扩散角算出垫层宽

表5 计算结果汇总  
Tab. 5 Summary of calculation results

罐体编号	直径方向整体倾斜/mm	罐周边不均匀沉s/L	基础最大沉降/mm	基础最小沉降/mm	基础平均沉降量/mm
罐 01	0.000 15 <i>D</i>	0.000 47	157	116	137
罐 02	0.000 09 <i>D</i>	0.000 35	160	117	139
罐 03	0.000 18 <i>D</i>	0.000 47	155	114	133
罐 04	0.000 36 <i>D</i>	0.000 59	164	116	143
罐 05	0.000 15 <i>D</i>	0.000 59	165	120	140
罐 06	0.000 37 <i>D</i>	0.000 59	172	122	150
罐 07	0.000 30 <i>D</i>	0.000 47	167	121	142
罐 08	0.000 15 <i>D</i>	0.000 47	157	113	137

度,并根据当地土方开挖经验放坡,以保证基础传来的上部结构重量有效扩散到持力层上。

(3)为减小罐体后期使用时的沉降及差异沉降,建议在罐体做充水试验时采用充水预压的方式,分级充水,每级荷载下沉降稳定后再进行下一级充水,直到充水至最大高度。

(4)本工程在施工及使用过程中应进行沉降观测,沉降观测应从基础底板施工完毕时开始,直至沉降稳定为止。

## 参考文献

- [1] 刘晓风,袁月祥,闫志英. 生物燃气技术及工程的发展现状[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 924-930.  
LIU Xiao-feng, YUAN Yue-xiang, YAN Zhi-ying. Progress on biogas technology and engineering[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 924-930.
- [2] 刘小文,常立君,耿小牧. 油罐地基产生不均匀沉降原因分析及纠偏方法探讨[J]. 建筑技术, 2008, 39(5): 354-356.  
LIU Xiao-wen, CHANG Li-jun, GENG Xiao-mu. Reason analysis of uneven settlement of oil tank foundation and research of rectification measures[J]. Architecture Technology, 2008, 39(5): 354-356.
- [3] 陈志平,葛颂,沈建民,等. 大型原油储罐有限元分析建模的新方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(6): 977-981.  
CHEN Zhi-ping, GE Song, SHEN Jian-min, et al. New modeling method for finite element analysis of large oil storage tanks[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(6): 977-981.
- [4] 石磊,帅健,许葵. 基于FEA模型和API653的大型油罐基础沉降评价[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(3): 114-119.  
SHI lei, SHUAI Jian, XU Kui, Assessment of large-scale oil tanks foundation settlement based on FEA model and API 653[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(3): 114-119.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢制储罐地基基础设计规范: GB 50473-2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.