

文章编号:1673-5005(2009)06-0100-05

# 软土地区储罐群地基沉降的三维数值模拟

程旭东<sup>1</sup>, 马红<sup>1</sup>, 刘永红<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**在软土地区修建储罐群的过程中, 不均匀沉降成为工程的主要控制因素之一。由于沉降问题受到储罐间距、孔隙水压力变化等动态因素的影响, 使得问题的解决趋于复杂。运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件, 建立三维非线性有限差分模型, 综合各种变化因素的影响, 研究软土地区不同净距的储罐群地基的变形及应力分布, 模拟分析不同净距对储罐沉降和沉降差的影响。结果表明, 在考虑地基土附加应力和超孔隙水压力共同作用时, 储罐净距为 0.6D (D 为储罐直径) 左右时比较合理。

**关键词:**储罐群; 储罐间距; 孔隙水压力; 三维有限差分模型

**中图分类号:**TU 433 **文献标识码:**A

## Three-dimensional numerical simulation of foundation settlement of storage tank group in soft soil area

CHENG Xu-dong<sup>1</sup>, MA Hong<sup>1</sup>, LIU Yong-hong<sup>2</sup>

(1. College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** In the process of constructing storage tank in soft soil area, the differential settlement is one of the main controlling factors. As the result of the influence of some dynamic factors such as tank spacing, pore water pressure change, the issue of the settlement tends to complex. By using FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software, a three-dimensional nonlinear finite difference model was established. Synthesizing various factors, the deformation behavior and the stress distribution of the foundation of storage tank group with different clear distance in soft soil area were studied. The effects of different clear distances on the tank settlement and differential settlement were analyzed. The results show that in considering the additional stress of foundation soil and the excess pore water pressure together, it is reasonable when the tank spacing is 0.6 times the tank diameter.

**Key words:** storage tank group; tank spacing; pore water pressure; three-dimensional finite difference model

储罐结构广泛应用于石油、化工、电力等工业领域。在软土地基上建造储罐, 无论是采用砂垫层预抬高方案, 还是砂井充水预压法进行地基处理, 在充水加荷过程中都曾出现储罐基础差异沉降, 使储罐产生倾斜, 给管线安装和油罐运行使用带来困难。特别是储罐群的建设, 罐和罐之间不仅由于应力叠加使地基受力不均匀, 而且储罐群中心处地下水如果未经处理亦会产生较大的孔隙水压力, 导致储罐地基应力分布不均, 造成储罐的整体均匀沉降、底板的碟形沉降、储罐的平面倾斜及储罐的非平面倾斜<sup>[1]</sup>等。笔者对储

罐群在不同间距下充水加荷过程中地基产生超孔隙水压力导致不均匀沉降进行分析。

### 1 三维数值模拟的基本原理

FLAC<sup>3D</sup> 是快速拉格朗日三维有限差分程序, 由美国 Itasca 公司编制, 专门用来求解岩土工程问题。该程序的最大优点是计算时不必形成刚度矩阵, 在求解非线性问题时, 比有限元法要快, 而且其内置的渗流计算模式能够考虑渗流场和应力场的耦合, 用户可以通过定义土体为渗流模型来求解地下水影响

收稿日期: 2009-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874115)

作者简介: 程旭东(1971-), 男(汉族), 安徽桐城人, 副教授, 博士研究生, 主要从事土木工程及油田地面工程结构方面的教学及科研工作。

下的各种岩土工程问题<sup>[2]</sup>。

### 1.1 本构模型

FLAC<sup>3D</sup>程序内置有 10 种应用较为广泛的弹性和塑性模型,本文中采用的是 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。该模型采用组合的破坏准则:张拉剪切破坏准则和 Mohr-Coulomb 破坏准则<sup>[3,4]</sup>。

Mohr-Coulomb 破坏准则为  $f' = 0$ , 屈服方程为

$$f' = \sigma_1 - \sigma_2 \left[ \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \right] + 2c \sqrt{\frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)}}, \quad \sigma_1 \leq \sigma_3 \quad (1)$$

式中,  $c, \phi$  分别为土体粘聚力、内摩擦角;  $\sigma_1 \sim \sigma_3$  为主应力。

张拉破坏准则为  $f' = 0$ , 屈服方程为

$$f' = \sigma_3 - \sigma_t \quad (2)$$

式中,  $\sigma_t$  为土体张拉强度。

方程(1)和(2)中对“小主应力” $\sigma_1$ 和“大主应力” $\sigma_3$ 的定义与岩土力学理论中定义的相反。因为在 FLAC<sup>3D</sup>程序中,规定材料受拉为正,受压为负,所以习惯所说的大主应力在这里实际上是“小主应力”,为最小值。

### 1.2 固结理论

一般认为,软土地基在外力作用下的沉降要经历 3 个不同的阶段:瞬时沉降、主(排水)固结沉降和次固结沉降,可表示为

$$S(t) = S_i(t) + S_d + S_c(t) \quad (3)$$

式中,  $S(t)$  为地基在时间  $t$  的总沉降;  $S_i(t)$  为地基的次固结沉降;  $S_d$  为地基的瞬时沉降;  $S_c(t)$  为地基的排水固结沉降。

考虑到土体 3 个方向上的排水和变形,建立 3 向固结方程。目前解决 3 向固结问题有两种方法,一是太沙基-伦杜立克(Rendulic)理论,另一种是比奥(Biot)理论。Biot 固结理论被称为真三轴固结理论,其理论方程为

$$\begin{cases} \left( \frac{3K+G}{3} \right) \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} + G \nabla^2 u - \frac{\partial u_w}{\partial x} + X = 0, \\ \left( \frac{3K+G}{3} \right) \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial y} + G \nabla^2 v - \frac{\partial u_w}{\partial y} + Y = 0, \\ \left( \frac{3K+G}{3} \right) \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial z} + G \nabla^2 w - \frac{\partial u_w}{\partial z} + Z = 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{1}{3K} \frac{\partial(\Theta - 3u_w)}{\partial t} + \frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} + \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = 0. \quad (5)$$

其中

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

$$\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z.$$

式中,  $X, Y, Z$  分别为  $x, y, z$  方向的体力分量;  $K$  为体积变形模量;  $G$  为剪切弹性模量;  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向土体的位移分量;  $u_w$  为孔隙水压力;  $\Theta$  为体积应力;  $k_x, k_y, k_z$  分别为  $x, y, z$  方向的渗透系数;  $t$  为时间。

结合边界条件和初始条件,联立式(4)、(5)可以求得地基中任一点、任一时刻的位移和孔隙水压力。

## 2 模型的建立及参数的确定

以大港油田某销售分公司油库扩建工程拟建 4 具 2000 m<sup>3</sup> 内浮顶钢质拱顶储罐为研究模型。储罐直径  $D = 14.5$  m, 高  $H = 14.3$  m, 储罐净距为  $d$ , 位置布置如图 1 所示。

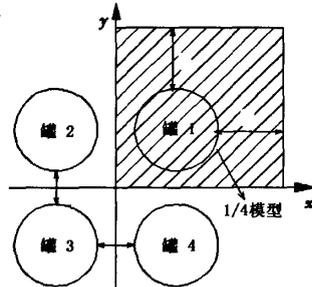


图 1 储罐的平面布置

Fig. 1 Layout of storage tanks

该试验场软土的物理力学性能见表 1。地面始终和空气接触,孔压保持常值为零,在 FLAC<sup>3D</sup>分析中不考虑土颗粒的变形,考虑水的压缩性,取室温下水的体积模量为 2.0 GPa。

由于模型的对称性,取 1/4 进行分析(图 1)。横断面方向取距罐壁距离  $l = 30$  m,纵断面方向参照实际试验段的深度选取  $H = 28.5$  m。单元采用六面体的形式,假设储罐基础为刚性基础,且与地基土间为无粘性接触,其在 FLAC<sup>3D</sup>中 1/4 模型人鸟瞰图见图 2。

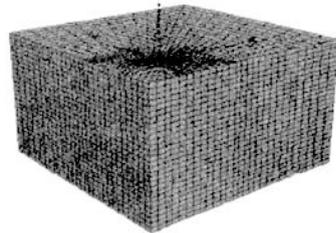


图 2 1/4 模型鸟瞰图

Fig. 2 Bird eye view of quarter model

表1 软土的物理性能

Table 1 Physical properties of soft soil

土层编号	土体性质	土层厚度	体积变形模量	剪切弹性模量	内摩擦角	粘聚力	土体密度
		<i>h/m</i>	<i>K/MPa</i>	<i>G/MPa</i>	$\varphi/(\text{°})$	<i>F/kPa</i>	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
①	粉质粘土	7.2	8.8	1.9	21	12.4	1938
②	淤泥质粘土	5.0	5.0	1.1	7.4	14.2	1888
③	粉质粘土	6.5	7.8	1.7	18.9	12.8	1995
④	粉质粘土	9.8	14.0	3.0	22.3	30.4	2010

### 3 模拟结果及分析

通过改变罐之间的净距考察如图1布置的4具储罐之间的相互影响,寻求储罐的最优净距。分析方案有4种,即相邻两具储罐净距离  $d$  分别为  $0.4D, 0.6D, 0.8D$  和  $1.0D$  ( $D$  为储罐直径),实际距离分别为  $5.8, 8.7, 11.6, 14.5 \text{ m}$ 。

模拟的基本过程:按照基本假定的几何尺寸,受较大网格划分较密集<sup>[5]</sup>,其他部分适当放宽建立

模型,并赋予模型不同位置土的物理参数。先施加不排水边界条件,对模型进行地基静力平衡计算,建立初始地应力场<sup>[6]</sup>;继而再分析储罐在快速充满水荷载作用下引起的孔压响应,并考虑储罐的自重<sup>[7]</sup>。

#### 3.1 储罐净距对地基土沉降的影响

通过 FLAC<sup>3D</sup> 模拟不同储罐净距时地基土的沉降变化,得出各个模型的沉降云图如图3所示。

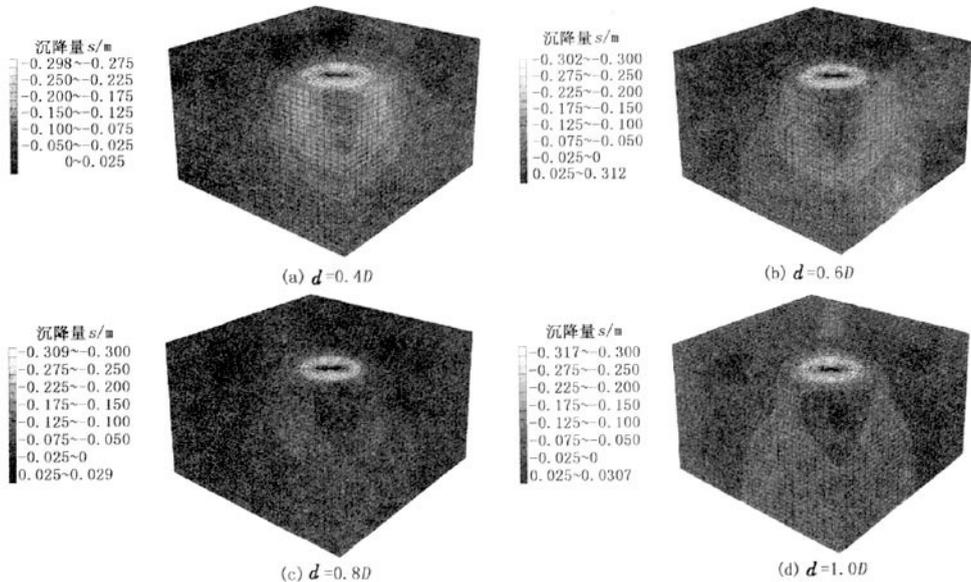


图3 不同储罐净距的沉降云图

Fig.3 Settlement cloud of different tank clear distance

云图中负号代表土体沉降,正号代表土体发生隆起。随着颜色的变淡,沉降变大,主要在储罐群内侧发生沉降。在颜色较深的地方土体发生隆起,其土体隆起量为  $0.025 \sim 0.0307 \text{ m}$ ,主要发生在储罐群外围,在罐群内侧也有少部分区域地基土发生隆起。由图3可以得出:随着储罐净距的逐渐增大,储罐群周围土体的隆起区域逐渐变小,储罐群中心处土体的沉降量也发生变化。当  $d = 0.4D$  时,罐群四周的隆起区域比较大,且罐群中心处沉降比较大;当  $d = 0.6D$  时,罐群四周的隆起区域与  $d = 0.4D$  相比

减小,特别是罐群中心处沉降最小;当  $d = 0.8D$  时,罐群四周的隆起区域稍微减小,但罐群中心处沉降相比于  $d = 0.6D$  时反而增大;当  $d = 1.0D$  时,罐群四周的隆起区域最小,而罐群中心处沉降仍相比于  $d = 0.6D$  时大。综上所述,在  $d = 0.6D \sim 0.8D$  时储罐群中心处土体的沉降量和影响区域都比较小,这是由于随净距增大,超孔隙水压力衰减速率不同于罐间地基土附加应力叠加范围的减小速率的缘故,二者之间存在一个相互间可以抵消的罐壁间距范围,即  $0.6D \sim 0.8D$  的范围。

### 3.2 特殊点沉降及沉降差观测

为了更好地研究不同储罐净距时地基土沉降规律,沿罐环向和径向布置测点(图4)。由对称性均匀布置4个径向的测点<sup>[8,9]</sup>,分别是方向一:C-D;方向二:E-F;方向三:M-N;方向四:H-G,及4具储罐的中心点B,以计算最大沉降量和沉降差<sup>[10]</sup>。

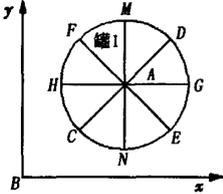
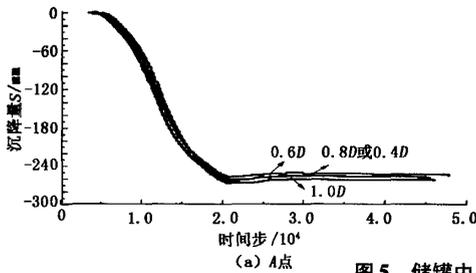


图4 测点布置

Fig. 4 Arrangement of measuring point

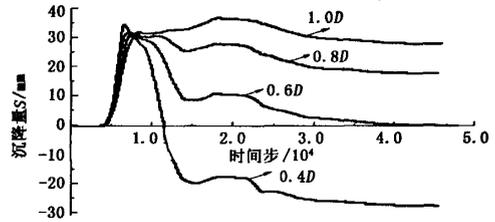
#### 3.2.1 储罐1中心点地基沉降量对比

由软件后处理部分可得出如图5(a)所示的A点沉降量变化曲线。从图5(a)可以看出,不同间距



(a) A点

下储罐1中心A点的沉降发生变化,这是由储罐群之间的地基土附加应力和超孔隙水压力的共同作用引起的。当储罐净距d约为0.6D时,储罐1中心A受到储罐群之间的地基土附加应力和孔隙水压的共同作用的合力最小,所以在d=0.6D时产生相对比较小的沉降量;当d=0.4D时沉降量反而比d=0.6D时大,这是因为随着储罐净距变小,储罐之间地基土附加应力逐渐增大,超孔隙水压力也随之增大,但共同作用的合力大于d=0.6D时的合力,从而使沉降量增大;当d=0.8D和d=1.0D时沉降量均大于d=0.6D时的沉降量,且d=1.0D时沉降量最大,这是因为随着储罐净距增大,储罐之间地基土附加应力和超孔隙水压力均随之减小,但地基土附加应力减小速率小于超孔隙水压力的减小速率,共同作用的合力大于d=0.6D时的合力,所以沉降量逐渐增大直至达到单一储罐的自身沉降量。



(b) B点

图5 储罐中心不同点的沉降量

Fig. 5 Settlement of different point of tanks center

从图5(b)可以看出,由于相邻储罐的影响,在不同间距下,储罐群中心点B的沉降量也发生变化。当间距d=0.6D时,中心处B的最终沉降量几乎为零,这是因为此时中心处B点的储罐间的地基土附加应力和其超孔隙水压力相互抵消;当间距d=0.4D时,中心B处下沉,这是因为此时中心处B点的储罐间的地基土附加应力大于其超孔隙水压力;当罐壁间距d>0.6D时,中心处B点的土体发生隆起变形,这是因为此时中心处B点的储罐间的地基土附加应力和其超孔隙水压力虽然均随d增大而减小,但超孔隙水压力大于地基土附加应力,从而使中心处B点土体发生隆起变形。

#### 3.2.2 罐周沉降差对比

由于模型具有对称性,E-F方向的沉降差为零,H-G方向的沉降差与M-N方向的沉降差相同。沉降差正值代表向罐群内侧方向倾斜,负值代表向罐

群外侧方向倾斜。由图6(a)可以看出M-N方向的沉降差随着间距的增大而减小,即向N方向倾斜逐渐减小。从图6(b)可以看出;罐壁间距在0.6D时C-D方向沉降差较小,几乎为零;当间距在0.4D时,C-D方向向罐群中心倾斜。当d=0.4D时,M-N方向倾斜度 $\Delta S/D = 38 \text{ mm}/14500 \text{ mm} = 0.263\%$ ,根据《石油化工企业钢储罐地基与基础设计规范》(SH3068-1995)要求对于容积为2000 m<sup>3</sup>内浮顶罐要求其最大倾斜度 $\leq 0.25\%$ ,说明当d=0.4D时倾斜度不符合规范要求。当d>0.6D时,倾斜度虽然满足了规范要求但实际工程会增大占地面积。

上述几种情况均反应了储罐群间的地基土的附加应力和力学作用引起的超孔隙水压力对储罐群地基土的沉降影响的相同规律,即储罐间净距在0.6D左右时储罐的沉降量和沉降差均较小,说明此时储罐群相互影响较小。

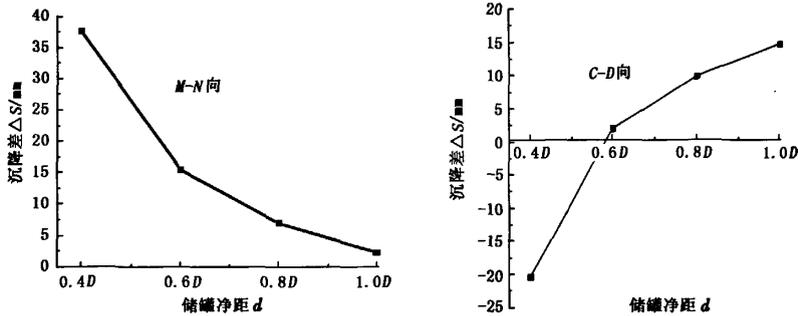


图6 M-N及C-D沉降差

Fig. 6 Differential settlement of M-N and C-D

### 3.3 工程实际沉降及沉降差观测结果

大港油田某销售分公司油库扩建工程拟建的4具2000 m<sup>3</sup>内浮顶钢质拱顶储罐实际罐间距d为6.500 m,约等于0.4D。4具罐安装好后先给罐1和罐4注水预压,由于注水速度较快,3 d后罐内水高达11 m,这时发现4具罐均发生不同程度的沉降和倾斜,停止注水进行沉降和沉降差观测。6 d后的观测结果为:罐1向外侧倾斜,沉降差为130 mm,累积最大沉降量达288 mm;罐4亦向外侧倾斜,沉降差为170 mm,累计最大沉降量达338 mm。该工程随后被定性为工程事故,需采取措施进行纠偏。虽然该工程4具罐没有同时注水且没有达到最大水高,但该工程的实际观测结果和本文的数值模拟所得出的沉降及沉降差规律是一致的。

## 4 结束语

基于FLAC3D程序,建立了三维非线性有限差分数值模型,分别研究了不同储罐间距对储罐群地基土沉降规律的影响。在考虑地基土附加应力和力学引起的超孔隙水压力的共同作用时,储罐间距为0.6D左右时比较合理。在储罐防火规范中要求储罐净距要满足0.4D,建议在沿海软土地区中,如果地基土不经过排水处理,储罐净距宜满足0.6D,如果受场地或其他条件限制不能达到0.6D时,需要进行地基处理以避免储罐群发生不均匀沉降。

### 参考文献:

[1] 赵阳,曹庆帅,谢新宇.大型钢储罐的沉降与结构性能的关系[J].工业建筑,2007,37(4):65-68.  
ZHAO Yang, CAO Qing-shuai, XIE Xin-yu. The relationship of the settlement and the structural properties in a large steel storage tank [J]. Industrial Architecture, 2007, 37(4): 65-68.

[2] COETZEE M J, HART R D, VARONA P M, et al. FLAC Basics [R]. Itasca Consulting Group Inc, 1995.

[3] Itasca Consulting Group, Inc. Theory and background-fast Lagrangian analysis of Continua [R]. Minnesota, 2001.

[4] Itasca Consulting Group, Inc. Verification problems-fast Lagrangian analysis of Continua [R]. Minnesota, 2001.

[5] 高俊合.考虑固结、土-结构相互作用的基坑开挖有限元分析[J].岩土工程学报,1999,21(5):628-630.  
GAO Jun-he. Finite element analysis of foundation pit excavation with consideration of consolidation and soil-structure interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 628-630.

[6] 李春光,王水林,郑宏,等.多孔介质孔隙率与体积模量的关系[J].岩土力学,2007,28(28):293-296.  
LI Chun-guang, WANG Shui-lin, ZHEN hong, et al. Relationship between bulk modulus and porosity of porous medium [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(28): 293-296.

[7] ZHENG Xin-liang, DONG Zhi-liang, YANG Fu-lin. A study on variation law of pore water pressure in soil reinforced by vacuum and surcharge preloading [J]. Port and Waterway Engineering, 2004(2): 4-6.

[8] HU Y, RANDOLPH M F. A practical numerical approach for large deformation problems in soil [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 22, 327-350.

[9] 毕波,于式章.大型储罐基础非平面倾斜问题的探讨[J].石油工程建设,2003,29(6):1-4.  
BI Bo, YU Shi-zhang. Discuss of the non-planar tilt of the large-scale tank base [J]. Petroleum Engineering Construction, 2003, 29(6): 1-4.

[10] 赵家伟.大型油罐充水预压试验环墙基础不均匀沉降预测[J].岩土工程界,2001,4(1):38-41.  
ZHAO Jia-wei. The forecast to differential settlement of annular wall foundation of controlled water tests to pre-load large oil tanks [J]. Geotechnical Engineering, 2001, 4(1): 38-41.

(编辑 沈玉英)