

采空区可调倾度的储油罐筏基设计

钟 怀 庆

(徐州煤炭建筑工程学校)

一、引 言

煤矿采空区的地表下沉, 对地面建筑物产生诸多破坏影响, 早为国内外专家学者所关注, 并作了大量研究和探索。多年来, 大都采用重点加固、或搬迁另建的措施, 然而收效不一。近年来, 经济建设迅速发展, 特别是城市用地日益紧张。于是, 如何科学地利用采空区地表, 做到最大限度地节约城市用地, 必将越来越显示出它的现实意义。

本文通过某地石油库扩建工程的实践, 提出在采空区下沉盆地范围内, 兴建可调倾斜度的储油罐的技术总结, 供设计和有关方面参考。

二、工程概况

某石油公司油库, 于1966年始建, 位于某矿东翼煤层上方, 下有四个煤层组。开采深度距地表为197~362m之间, 煤层顶底多为页岩和砂质页岩, 仅少量为砂岩和石灰岩。

地下回采计划与地面拟建油罐的位置对照见图1所示。

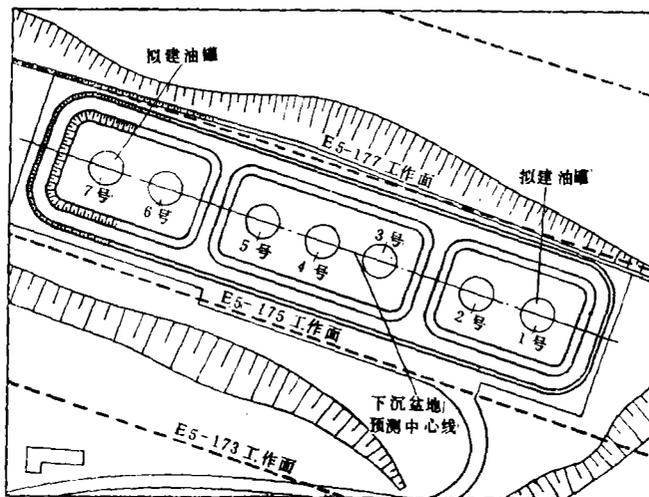


图1 某地储罐与采煤区位置相关图

为解决地下煤层开采与地上油库扩建的矛盾, 采用可调筏基方案, 以确保储油罐在采动

变形期间的安全和正常运行。

该工程于1983年4月破土,10月建成四个可调筏基。1984年2月开始罐体及管路安装,5月竣工。并即对整体工程进行充水试压,以满罐水头13m静压4天,各罐基下沉渐趋稳定,7天后测得各可调筏基的最大下沉分别为39、36、27及34mm,卸水回弹上升值分别为4、5、2及3mm,情况正常。

1984年6月初,一矿E-177回采面进入库区北侧地下,自1号罐开始,各罐逐日发生向北的倾斜下沉。9月初,4号罐倾斜下沉110mm,超过了国家商业部颁发的《石油库管理制度》中“罐体倾斜不超过1%,最大限度不超过5cm”的规定。

于是选定4号罐为倾斜度调整的试点罐,经过个4个月的调整、观测、分析等工作,于11月已将4号罐的倾斜下沉调整为60mm,并再次做了充水试压,使最终倾斜稳定为40mm。在总结4号罐调整方法的基础上,其余的罐都做了相对调整,经有关部门鉴定验收后交付使用。

三、采动区地表变形特征及对建筑物的影响

采动期间地表之所以发生变形,是由于地下煤层被采出后,引起了煤层上方覆岩破坏的结果。而覆岩破坏却是一种复杂条件的力学过程,它与许多条件有关,由于人为和赋存条件各异,覆岩的破坏特征及形态也不尽相同。

如以近似水平煤层为例,地下煤层采出后,采空区顶板岩层在自重及其以上覆岩的作用下,向下弯曲移动,当其内力超过岩石抗拉强度的极限时,直接顶板首先断裂、破碎而陷落。上部的老顶岩层,便以梁或悬臂梁的受力形式,沿层面法线方向向下发生弯曲、移动,进而产生新的断裂、离层,如图2所示。随着回采工作面向前推进,岩层向下弯曲、移动范围越发扩展。当这种扩展过程发展到地表,便使地面形成下沉的盆状洼地。

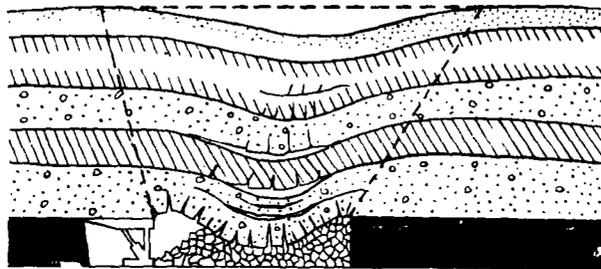


图2 覆岩移动示意图

据有关资料〔1,2〕介绍,当工作面推进离开切眼的距离为平均采深 H_0 的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 时,开始波及地表引起下沉。移动盆地便是在地下工作面推进过程中由 W_1 到 W_2 逐渐形成,如图3所示。当工作面推进到回采边界后,回采停止,但地表移动并不立即停止,还要继续一段时间,直至最后稳定,形成最终的下沉盆地 W_3 。

地表移动的持续时间,主要与岩性、采深等因素有关。在其他条件相同的情况下,采深与持续时间成正比。据有关资料〔2〕介绍,采深为200~300m时,地表移动持续时间为1~2年,其中活跃期为6个月左右。

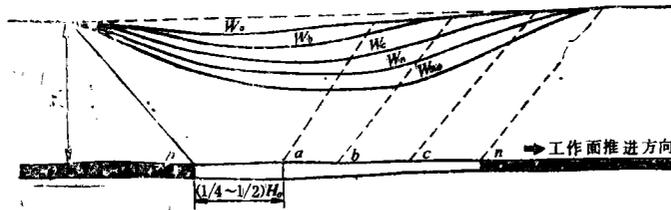


图3 地表移动盆地的形成

地表移动稳定后下沉盆地的剖面特性, 可用波兰克诺特 (Knothe, St.) 方法, 给出地面某点 x 的下沉值 S_x 。

$$S_x = \frac{S_{max}}{r} \int_x^{\infty} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} dx$$

并据此推导出稳定下沉盆地主断面内的倾斜 T_x 、曲率 K_x 、水平移动 U_x 、水平变形 ϵ_x 等等的表达式, 如图4所示。

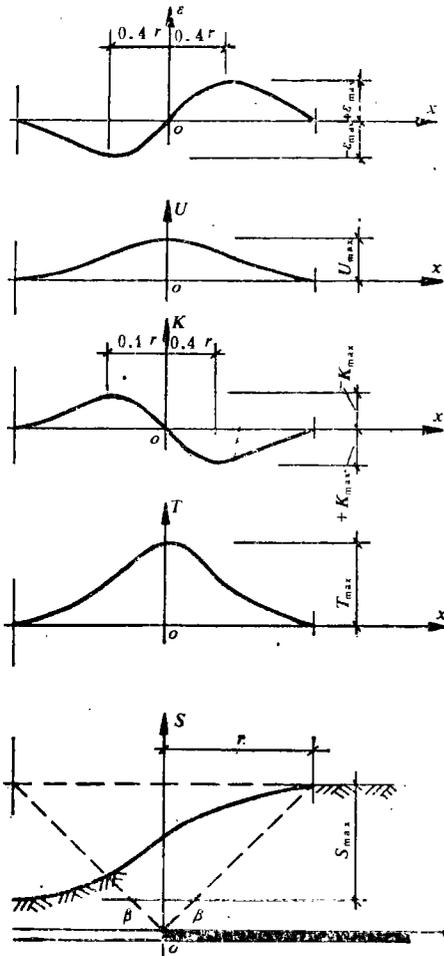


图4 移动盆地边缘区地表下沉特征

$$T_x = \frac{S_{max}}{r} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}}$$

$$T_{max} = \frac{S_{max}}{r} \quad (x=0)$$

$$K_x = -\frac{2x \cdot S_{max}}{r^3} x \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}}$$

$$K_{max} = \pm 1.52 \frac{S_{max}}{r^3} \quad (x=0.4r)$$

$$U_x = \beta \frac{S_{max}}{r} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}}$$

$$U_{max} = \beta \frac{S_{max}}{r} \quad (x=0)$$

$$\beta = \frac{r}{\sqrt{2\pi}}$$

$$\epsilon_x = \pm \beta \frac{2\pi S_{max}}{r^3} x \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}}$$

$$\epsilon_{max} = \pm 1.52\beta \frac{S_{max}}{r} \quad (x=0.4r)$$

式中 S_{max} —— 最大下沉值;

r —— 主要影响半径。

地表移动与变形, 将引起建筑物及其基础有如下的移动和变形:

- 1.当地表呈水平均匀下沉, 建筑物仅有垂直向下的移动, 较少产生破坏影响。
- 2.当地表产生倾斜变形, 将引起建筑物倾斜和基础内力重新分布, 使建筑结构内力发生变化而导致破坏。
- 3.当地表产生曲率变形, 在正(负)曲率作用下, 地表发生上凸(下凹)变形, 建筑物基础的侧边(中央)将发生部分悬空, 使地基应力集中, 导致基础及建筑物破坏。
- 4.当地表发生水平变形, 将对建筑物的基础产生拉伸或压缩的作用, 也是危害建筑物的一个因素。

上述地表变形的各种状态, 实际上不以单一状态的形式发生, 乃是随着下沉盆地的形成, 而先后综合出现。

为此, 在油库总平面设计时, 应将油罐布置在预测最终(稳定)下沉盆地的中央区域, 使油罐最终仅发生垂直下沉, 以减少危害程度。而油罐基础的设计, 要在地表下沉曲线开始进入基底范围的一段时间内, 则必须考虑地表的倾斜、正(负)曲率变形、水平变形等各种破坏因素, 以确保油罐的安全。

四、储油罐基础抗地表变形的设计

为适应地表变形对地面建筑物产生的多种破坏作用, 油罐基础应采用整体筏型基础为宜。现就这种筏型基础的整体倾覆、悬面积受荷、正(负)曲率影响、水平变形影响等几个特殊问题叙述如下。

1. 抗倾覆设计

当地表下沉曲线开始进入基底范围并向基底中心进展, 油罐便自平稳状态向倾斜状态过渡, 罐基以上的负载开始产生偏心, 便引起附加力矩。

但据有关资料〔1〕介绍, 采动后引起高管建筑物如烟筒等的倾覆力矩, 其值甚小, 构不成倾覆危害。而对于油罐而言, 它在油品储运过程中占有重要地位, 且其本身具有易燃易爆等特点, 为提高其安全度、避免次生灾害, 则应以地基应力不出现拉应力为条件, 进行抗倾覆设计。

图5为位于地表下沉曲线始端的油罐倾覆计算简图。

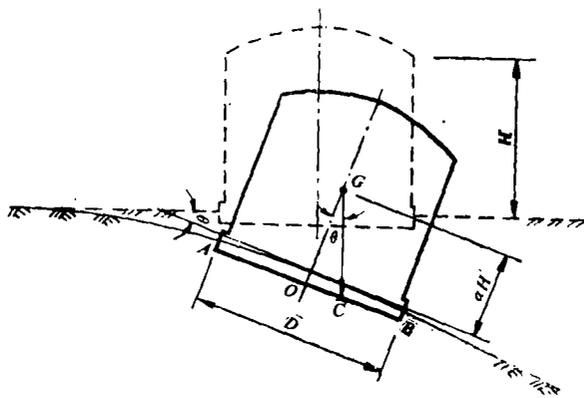


图5 下沉曲线始端油罐倾覆简图

由“截面核心”(Core of Section)理论可知, 当此重力作用线偏离基底中心O点的距离 $OC \geq (1/8) \cdot D$ 时, 基底一侧将出现拉应力, 从几何关系可知:

$$OC = \alpha \cdot H \operatorname{tg} \theta$$

此处 $\operatorname{tg} \theta$ 即是罐基中心所在地表的倾斜变形值。为保证油罐安全, 应用所在地表的预测最大倾斜值 T_{\dots} 来代替 $\operatorname{tg} \theta$, 其安全极限条件为:

$$OC = \alpha \cdot H \cdot T_{\dots}, \text{ 且 } \leq (1/8) \cdot D$$

即要求地表变形出现最大倾斜状态时, 基底也不出现拉应力。为此可将上式改写为:

$$D \geq 8\alpha \cdot H \cdot T_{\dots} \quad (1)$$

式中 D ——油罐筏基直径, m;

H ——油罐有效高度, m;

T_{\dots} ——罐址处预测地表最大倾斜, m/m;

α ——油罐重心高程系数。当圆柱体油罐满载时, 取 α 为 $1/2$; 若考虑基础自重在内, 则取小于 $1/2$ 的系数。

依此可作为初选筏基平面尺寸的必要条件, 务使筏基直径 D 满足式(1)要求, 以确保油罐整体的抗倾覆安全。

2. 悬面积受荷设计

当地表下沉曲线进入罐基范围以内, 地基上体便与基础底面逐渐脱离接触, 特别当曲率半径与基础尺寸相差比较大时, 这种土体与基底脱离接触的状态, 尤为明显, 如图6所示。

这时, 地基与基础的接触面积 F_1 逐渐减小, 形成的悬面积 F_2 则逐渐增大, 悬面积以上的部分基础, 便处在悬面受荷状态。

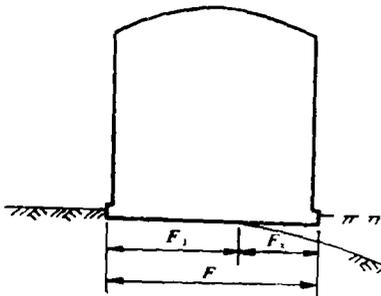


图6 基础脱离罐底状态

$$F_2 = \left(1 - \frac{R}{[R]}\right) F \quad (2)$$

式中 F_2 ——罐基下出现的悬面积;

R ——地应力;

$[R]$ ——地基允许承载力;

F ——罐基总面积;

$$F = F_1 + F_2$$

F_1 ——罐基在悬面受荷状态下的接触面积。

运用上式计算悬面积 F_2 时, 应考虑:

(1) 罐基使用过程中各种超载的可能, 应对地应力 R 乘以超载系数 K ;

(2) 悬面积 F_2 与基础总面积 F 之比, 应小于 50%。

则式(2)可改为:

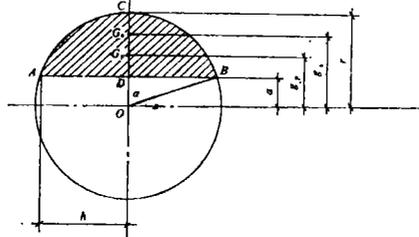
$$\frac{F_2}{F} = 1 - \frac{K R}{[R]}, \text{ 且 } < 50\% \quad (3)$$

式中 K ——使用期间超载系数, 可取 $1 \sim 1.2$;

其他符号同前。

当油罐筏基平面为圆形时，悬面积将为弓形。这时，计算弓形面积的荷载、重心、力臂等数值，较为繁琐。表 1 列出了悬面积为不同百分率的几何要素，可使计算工作得以简化。

圆悬面积几何要素 表 1



(r : 圆面积半径)

1	悬面百分率	F_s / F_c	25%	30%	35%	40%	50%
2	悬面积	$f = \frac{A_s}{A_c}$	$0.7854r^2$	$0.9425r^2$	$1.0996r^2$	$1.2566r^2$	$1.5768r^2$
3	悬弧长	$l = \overset{\frown}{AB}$	$2.3100r$	$2.4906r$	$2.6612r$	$2.8250r$	$3.1416r$
4	悬面边距	$a = OD$	$0.4039r$	$0.3197r$	$0.2378r$	$0.1578r$	0
5	悬面重心距	$g_f = OG_f$	$0.6497r$	$0.6019r$	$0.5559r$	$0.5108r$	$0.4244r$
6	悬弧重心距	$g = OG_s$	$0.7921r$	$0.7609r$	$0.7298r$	$0.6991r$	$0.6366r$
7	悬面半边长	$h = AD = DB$	$0.9148r$	$0.9475r$	$0.9713r$	$0.9875r$	$1.0000r$
8	悬面半圆心角	$\alpha = \sin^{-1}(h/r)$ (度)	66.18	71.35	76.24	80.93	90.00
9	悬面半圆心角	$\alpha = \sin^{-1}(h/r)$ (径)	1.1550	1.2453	1.0336	1.4125	1.5708

于是油罐筏基在悬面受荷状态下的附加内力可表达为：

$$M_{max} = q \cdot f(g_f - a) + p \cdot l(g_s - a) \tag{4}$$

$$Q_{max} = q \cdot f + p \cdot l \tag{5}$$

式中 M_{max} ——最大附加弯矩，t-m；

Q_{max} ——最大附加剪力，t；

q ——悬面积上的面布荷载，t/m²；

p ——悬面积上的线布荷载，t/m；

f 、 l 、 g_f 、 g_s 、 a 为悬面积的几何要素（详见表1）。

3. 正（负）曲率影响设计——影响半径法

考虑到油罐筏基在正（负）曲率变形作用下，并非基础下切进入土体的变形状态，而是地基土体与基础底面逐渐脱离接触，形成局部顶托的受力状态。其宏观形式（中央顶托或两侧边顶托），将因地表曲率变形值的正或负而异。但顶托状态下，基础与地基间接触面积的大小，必将受地基持力层允许承载力（R）的制约。为计算正（负）曲率影响下，筏基产生的附加应力及附加弯矩，提出“影响半径法”简述如下：

(1) 正负曲率影响下的筏基受力状态 移动盆地边缘地区发生正（负）曲率变形时，地表原赋的平面状态，将变为上凸（下凹）的曲面状态，变形区域筏基下的土体，自基础两侧（中央）逐渐脱离接触而下沉，形成中央（两侧）局部顶托，使两侧（中央）呈悬空的状态，如图 7 所示。

当地应力最大值 Q_{max} 大于地基允许承载力（R）时，地基局部出现塑性压缩区，随着塑性压缩区逐渐扩大，筏基将发生附加下沉，使地基与筏基间的接触面积有所增大，地应力集中

的最大值有所减小，于是出现新的平衡状态。如此反复，直到下沉稳定为止。

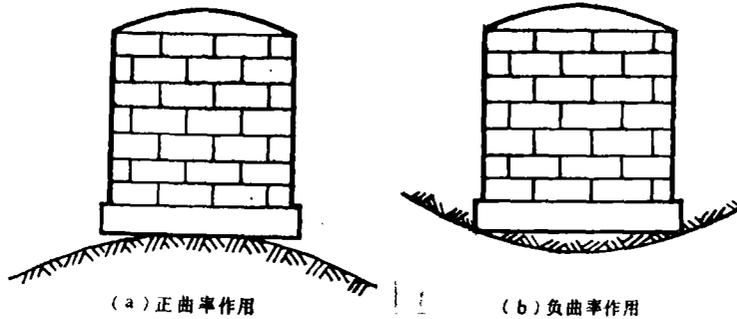


图7 正(负)曲率的筏基受力状态

但这种新平衡状态下的地应力，仍然是非均匀分布，就必然使筏基产生附加内力，构成破坏作用。

为了能对地表正(负)曲率变形下筏基附加弯矩进行定量分析，先设如下的假定条件：

a. 地表的正(负)曲率变形，按圆孤形状考虑，其曲率半径等于该处地表的预测曲率半径。

b. 地应力集中的应力分布图形，按线性分布。

c. 罐壁传来的线布荷载，作用于筏基周边，储油及自重等面布荷载均布于筏基平面。

根据如上假定条件，筏基在正(负)曲率变形下，可以有三种受力状态：

第一种受力状态：地基承载能力相对较低，在地表正(负)曲率变形作用下，附加下沉较迅速，呈现罐基全面积仍与地基全部接触的地应力集中状态，如图8所示。

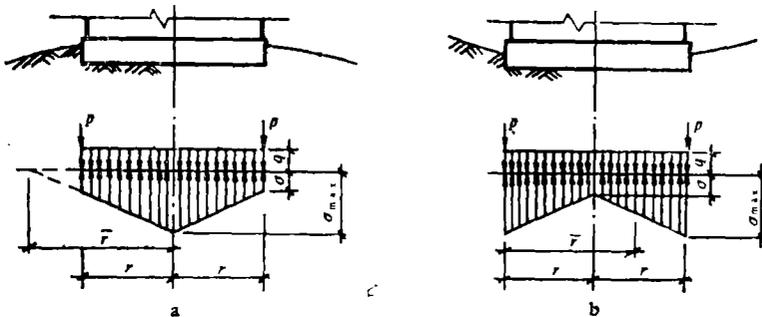


图8 地表正(负)曲率时地应力状态(一)

第二种受力状态：地基承载能力比较高，附加下沉较迟缓，而罐基两侧(中央)土体下沉，则比较迅速，呈现罐基中央(两侧)与地基接触，而两侧(中央)悬空的状态，如图9所示。

第三种受力状态：地基允许承载能力与罐基接触压力接近，地表恰好与罐基侧边相交，使罐基侧边(中央)的地应力为零，见图10。

若设地应力最大值 σ_{max} 至最小值 $\sigma=0$ 之间，沿径向的分布长度 r ，并以 r 表示油罐筏基半径，则自上述三种受力状态图形中，可有如下关系：

$\bar{r} > r$ 为第一状态
 $\bar{r} < r$ 为第二状态
 $\bar{r} = r$ 为第三状态

(6)

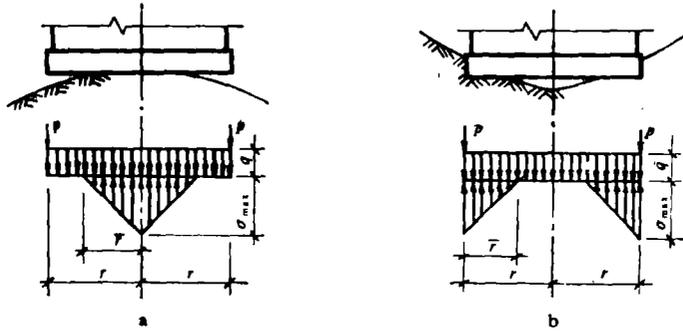


图9 地表正(负)曲率时地应力状态(二)

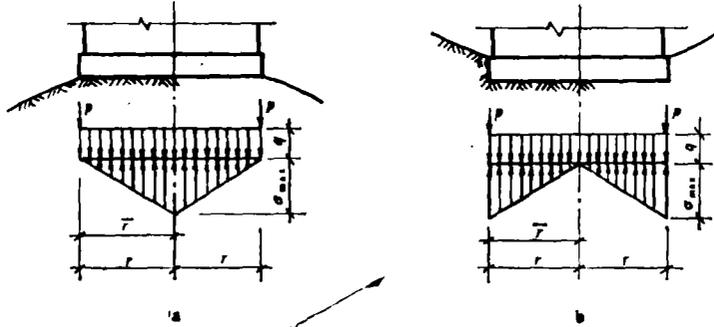


图10 地表正(负)曲率时地应力状态(三)

(2)地应力集中状态下的地应力影响半径 有正曲率变形及负曲率变形两种的影响半径。

a.正曲率变形作用时的影响半径: 此时,筏基底面下地应力集中的分布状态,可由图11所示坐标系的函数式表达。

即
$$Z = \sigma_{max} - \frac{\sigma_{max}}{r} x$$

式中 σ_{max} ——地应力集中的最大值;
 r ——油罐筏基半径。

于是可有地应力总和

即
$$\Sigma \sigma = 4 \int_0^r y Z dx$$

今取筏基平面图形圆的参数方程

为
$$y = r \cdot \sin t, \quad x = r \cdot \cos t$$

且有
$$dx = -r \cdot \sin t$$

于是得地应力总和

为
$$\Sigma \sigma = 4 \int_0^r y Z dx$$

$$\begin{aligned}
 &= 4 \int_{\pi/2}^0 (r \cdot \sin t) \sigma_{\dots} (1 - \cos t) (-r \cdot \sin t dt) \\
 &= 4 r^2 \sigma_{\dots} \left[\left(\frac{t}{2} - \frac{1}{4} \sin 2t \right) - \left(\frac{1}{3} \sin^3 t \right) \right]_{\pi/2}^0 \\
 &= \left(1 - \frac{4}{3\pi} \right) \pi r^2 \sigma_{\dots} \quad (7)
 \end{aligned}$$

由于地应力总和应与筏基总负荷相平衡, 故可有

$$\begin{aligned}
 \Sigma \sigma &= \Sigma (q + p) = \left(1 - \frac{4}{3\pi} \right) \pi r^2 \sigma_{\dots} \\
 &= 1.8083 r^2 \sigma_{\dots}
 \end{aligned}$$

式中 q 及 p 分别为筏基上的面布及线布荷载, 据此可以求出, 当地应力集中最大值为 σ_{\dots} 时, 用 r 表示地应力分布范围的表达式

$$r = \sqrt{\frac{\Sigma (q + p)}{1.8083 \sigma_{\dots}}}$$

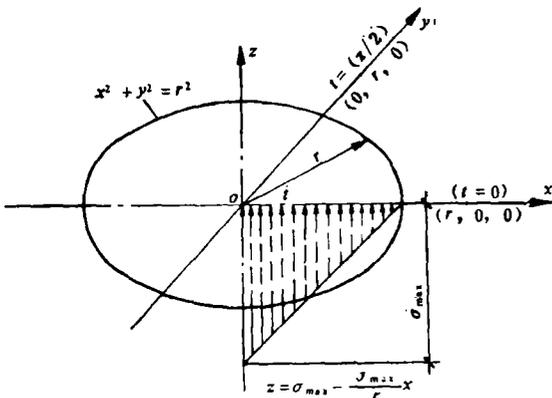


图11 正曲率变形时筏基地应力坐标系

运用式(8)和式(6), 便可判别地表正曲率变形时, 于不同负荷及不同地基承载力条件下, 油罐筏基的不同受力状态。

b. 负曲率变形作用时的影响半径: 此时, 地应力集中的分布状态, 可用图12所示坐标系的函数式表达

$$\text{即} \quad Z = \frac{\sigma_{\dots}}{r}$$

运用前节方法

$$\begin{aligned}
 \text{得} \quad \Sigma \sigma &= 4 \int_{\pi/2}^0 (r \cdot \sin t) (\sigma_{\dots} \cdot \cos t) (-r \cdot \sin t) dt \\
 &= -4 r^2 \cdot \sigma_{\dots} \left[\frac{1}{3} \sin^3 t \right]_{\pi/2}^0 \\
 &= \frac{4}{3\pi} \pi r^2 \sigma_{\dots} \quad (9)
 \end{aligned}$$

又已知筏基发生附加下沉而出现新平衡状态时, 地应力集中最大值 σ_{\dots} 与地基承载力 $[R]$ 之间, 应有如下关系:

$$\sigma_{\dots} \leq [R]$$

今即取 $\sigma_{\dots} = [R]$ 代入前表达式, 并命名此时的地应力分布范围为“地应力影响半径”, 拟以 \bar{r} 表示, 于是便得到正曲率变形作用时, 地应力集中状态的地应力影响半径 \bar{r}

$$\text{为} \quad \bar{r} = \sqrt{\frac{\Sigma (q + p)}{1.8083 [R]}} \quad (8)$$

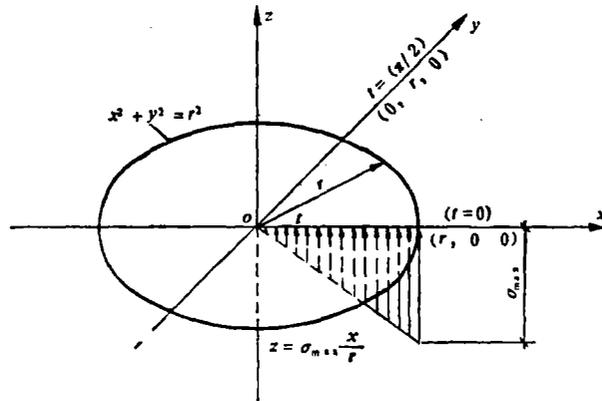


图12 负曲率变形时筏基地应力坐标系

以及 $\Sigma \sigma = \Sigma (q + p) = \frac{4}{3\pi} \pi r^2 \sigma_{max} = 1.3333 r^2 \sigma_{max}$

并取 $\sigma_{max} = [R]$ ，便得到负曲率变形作用时地应力影响半径 r

为
$$r = \sqrt{\frac{\Sigma(q + p)}{1.3333[R]}} \tag{10}$$

运用式 (10) 和式 (6)，也可以判别地表为负曲率变形时，筏基的不同受力状态。

(3)正(负)曲率影响下，附加应力计算 对油罐筏基的受力状态进行判别，并选定地应力分布图形后，便可进行附加应力计算。为节约篇幅，仅以正(负)曲率影响下的第一状态简叙如下。

a.正曲率影响第一状态内力计算，据叠加原理可知，第一状态应力图形，可由图13的两个图形叠加而得。

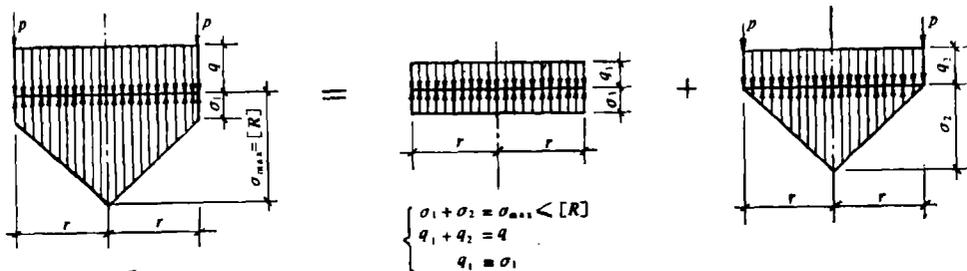


图13 正曲率情况下地应力叠加图

由于筏基上总负载并未增减，且有地应力集中后的最大值 $\sigma_{max} \leq [R]$ 等条件，可有以下关系：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_{max} = [R] \\ \sigma_1 + (1 - \frac{4}{3\pi})\sigma_2 &= \frac{1}{\pi r^2} \Sigma(q + p) \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

并据上述应力图形可有

$$\left. \begin{aligned} q_1 + q_2 &= q \\ \sigma_1 &= q_1 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

经过计算可得附加内应力对罐基中央的最大弯矩为:

$$M_{max} = p \cdot \frac{1}{2} 2\pi r \cdot a + q_2 \cdot \frac{1}{2} \pi r^2 b - \frac{1}{2} \Sigma \sigma_2 \cdot C_1 \quad (13)$$

式中 a ——线布荷载重心至筏基中心的距离, 查表 1 的 g , 值得 $a = 0.6366r$;

b ——面布荷载重心至筏基中心的距离, 查表 1 的 g_r 值得 $b = 0.4244r$;

$\Sigma \sigma_2$ ——最大值为 σ_2 的地应力总合,

$$\Sigma \sigma_2 = 4 \int_0^r yZ dx = 1.8083r^2 \sigma_2$$

(参见图 11 地应力总合解析过程),

C_1 ——地应力重心至筏基中心的距离,

$$C_1 = \frac{\int yZ dx \cdot x}{\int yZ dx}$$

其中 $\int yZ dx \cdot x = 2 \int_{\pi/2}^0 r^3 \sigma_2 (\sin^2 t \cos^2 t - \sin^2 t \cos t) dt = 0.27397r^3 \sigma_2$

$$\int yZ dx = 2 \int_{\pi/2}^0 r^2 \sigma_2 (\sin^2 t \cos t - \sin^2 t) dt = 0.90413r^2 \sigma_2$$

故有 $C_1 = 0.3030r$

将上述各常值代入式 (13), 则得附加内力对罐基中央的最大力矩为:

$$M_{max} = 1.9999r^2 p + 0.6667r^2 q_2 - 0.2739r^3 \sigma_2 \quad (14)$$

式中 p ——罐基上线布荷载, t/m ;

q_2 ——罐基上部分面布荷载, t/m^2 ;

σ_2 ——地应力集中的部分最大应力, t/m^2 ;

r ——罐基半径, m 。

b. 负曲率影响第一状态内力计算: 也可由两个图形叠加而得, 如图 14 所示。

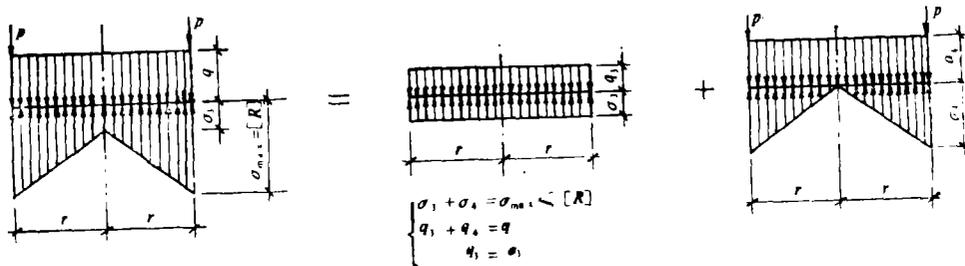


图 14 负曲率情况下地应力叠加图

同理, 上述图形中各荷载与应力之间, 也存在如下式类似关系

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_{max} = [R] \\ \sigma_1 + \frac{4}{3\pi} \sigma_2 &= \frac{1}{\pi r^2} \cdot \Sigma (q + p) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 + q_2 &= q \\ q_1 &= \sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

解出各应力和荷载的数值后,便可计算对罐基中央的最大附加弯矩为:

$$M_{\dots} = p \cdot \frac{1}{2} 2\pi r \cdot a + q_s \cdot \frac{1}{2} \pi r^2 \cdot b - \frac{1}{2} \Sigma \sigma_s C_s \quad (17)$$

式中 a 、 b 的物理意义和取值大小,与式(13)相同,仅将 $\Sigma \sigma_s$ 及 C_s 简叙于下。

$\Sigma \sigma_s$ 为最大应力 σ_s 的地应力总力(参见图12地应力总力解析过程)。

此时
$$\Sigma \sigma_s = \int_0^r 4yZ dx = 1.3333r^2 \sigma_s$$

而 C_s 为地应力重心至罐基中心的距离

此时
$$C_s = \frac{\int yZ dx \cdot x}{\int yZ dx}$$

其中
$$\int yZ dx \cdot x = 2 \int_{x/2}^0 -r^2 \sigma_s \sin^2 t \cos^2 t dt = 0.3927r^3 \sigma_s$$

$$\int yZ dx = 2 \int_{x/2}^0 -r^2 \sigma_s \sin^2 t \cos t \cdot dt = 0.6667r^3 \sigma_s$$

故有
$$C_s = 0.5891r$$

将各常量代入式(17)则得负曲率影响时,附加内力对罐基中央的最大力矩为:

$$M_{\dots} = 1.9999r^2 p + 0.6667r^3 q_s - 0.3927r^3 \sigma_s \quad (18)$$

式中 q_s —— 罐基部分面布荷载, t/m^2 ;

σ_s —— 地应力集中的部分最大应力, t/m^2 ;

其他符号同前。

c. 正(负)曲率影响下其他受力状态的内力计算,不再赘述。为计算工作需要,编制了表2供查用。

4. 水平变形影响的分析

地表的水平变形,发生在下沉盆地的边缘区域,及下沉曲线进入罐基范围的一段时间,地表在曲率影响下,引起相邻两点间水平距离发生变化,于是产生了地表对建筑物的拉伸或压缩作用。

当地表为正曲率变形时,水平位移为拉伸性变形,而为负曲率变形时,为压缩性变形。

就筏基而言,当处于正曲率影响下时,基础底面应承受附加弯矩的弯曲压应力作用,而处于负曲率影响下时,则需承受附加弯矩的弯曲拉应力作用。

就地表水平变形对筏基底部的附加拉压作用,将被同时存在的曲率附加弯矩作用所抵消。

5. 设计算例

(1) 已知指标

a. 罐址地表变形预测值: 最大水平变形 U_{\dots} 为 $5.8mm/m$, 最大倾斜 T_{\dots} 为 $28mm/m$, 最大曲率 K_{\dots} 为 $\pm 0.3 \times 10^{-3} 1/m$, 最大下沉 S_{\dots} 为 $1363mm$ 。

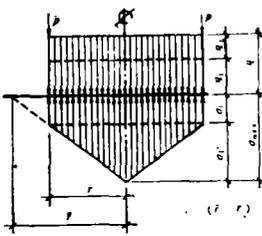
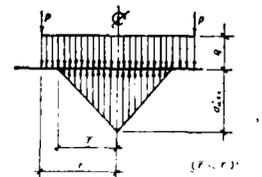
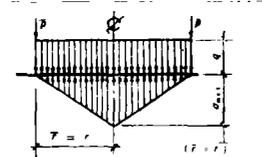
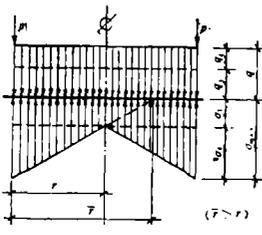
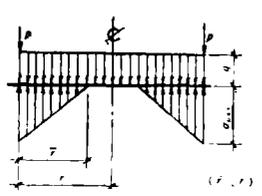
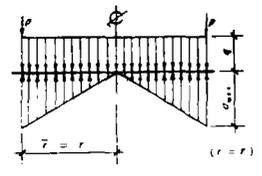
b. 地基允许承载力 $[K]$ 为 $18t/m^2$ 。

c. 罐体及筏基有关尺寸: 罐高 H 为 $12.65m$, 罐直径 D_g 为 $15.63m$, 筏基直径 D 为 $16.68m$ (半径 r 为 $8.34m$), 筏基中央厚度 h_1 为 $2m$, 筏基投影面积 F 为 $218.52m^2$ 。

d. 荷载数值: 筏基底面以上面布荷载 q 为 $10.93t/m^2$, 筏基底面以上线布荷载 p 为

正负曲率影响下附加弯矩计算表

表 2

应力状态	荷载、应力图形	最大附加弯矩(t·m)	备 注
正 曲 率 影 响	第一状态 	$M_{max} = A \cdot p + B \cdot q_2 - C_1 \sigma_2$ $A = 1.9999r^2$ $B = 0.6667r^3$ $C_1 = 0.2739r^3$	$\begin{cases} \sigma_1 + \sigma_2 = (R) \\ \sigma_1 + (1 - \frac{4}{3\tau})\sigma_2 = \frac{\Sigma(q+p)}{\pi r^2} \\ \begin{cases} q_1 + q_2 = q \\ \sigma_1 = q_1 \end{cases} \\ \sigma_{max} = (R) \end{cases}$
	第二状态 	$M_{max} = A \cdot p + B \cdot q - C_2 \sigma_{max}$ $A = 1.9999r^2$ $B = 0.6667r^3$ $C_2 = 0.2739r^3$	$Q_{max} = \frac{1}{2} 2\tau r p + \frac{1}{2} \pi (r^2 - r^2) q$ $\sigma_{max} = (R)$ $r = \frac{\sqrt{\Sigma(p+q)}}{1.8083(R)}$
	第三状态 	$M_{max} = A \cdot p + B \cdot q - C_3 \sigma_{max}$ $A = 1.9999r^2$ $B = 0.6667r^3$ $C_3 = 0.2739r^3$	$\sigma_{max} = (R)$
负 曲 率 影 响	第一状态 	$M_{max} = A \cdot p + B \cdot q_4 - C_4 \sigma_4$ $A = 1.9999r^2$ $B = 0.6667r^3$ $C_4 = 0.3927r^3$	$\begin{cases} \sigma_3 + \sigma_4 = (R) \\ \sigma_3 + \frac{4}{3\tau} \sigma_4 = \frac{\Sigma(q+p)}{\pi r^2} \\ \begin{cases} q_3 + q_4 = q \\ \sigma_3 = q_3 \end{cases} \\ \sigma_{max} = (R) \end{cases}$
	第二状态 	$M_{max} = A \cdot p + B \cdot q - C_5 \sigma_{max}$ $A = 1.9999r^2$ $B = 0.6667r^3$ $C_5 = 0.6667r^3 (\tau - 0.4110\tau)$	$r = \frac{\sqrt{\Sigma(q+p)}}{1.3333(R)}$ $\sigma_{max} = (R)$
	第三状态 	$M_{max} = A \cdot p + B \cdot q - C_6 \sigma_{max}$ $A = 1.9999r^2$ $B = 0.6667r^3$ $C_6 = 0.3927r^3$	$\sigma_{max} = (R)$

单位: p(t/m), q(t/m²), σ(t/m²); (R)(t/m²), r及r(m).

0.83t/m², 筏基总负荷 Σ(q+p)为2431.92t, 基底地应力 R = Σ(q+p)/F为11.13t/m², 使用期间超载系数K为1.05。

e. 筏基计算草图如图15所示。

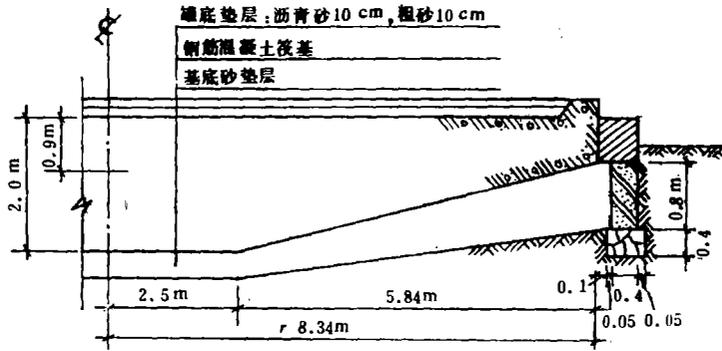


图15 筏基计算草图

(2) 抗倾覆设计

复核筏基平面尺寸，须满足式(1)要求。当储油为满罐时，重心位置最高，将为倾覆的最不利状况，故取： α 为1/2。

得 $8aHT_{max} = 8 \times \frac{1}{2} \times 12.65 \times \frac{28}{1000} = 1.42 \text{ m}$

而 $D = 16.68 \text{ m}$

所以 $D > 1.42 \text{ m}$ 故已安全。

(3) 悬面积受荷计算

a. 悬面积百分率：须满足式(2)要求，把有关数代入式(2)。

得 $F_1/F = 1 - (1.05 \times 11.13/18) = 35\%$ ，且小于50%。

b. 最大附加内力

① 切力 $Q_{max} = q \cdot f + p \cdot l$

自表1查得： $f = 1.0996r^2$ ， $l = 2.6612r$ 。代入上式

得 $Q_{max} = 10.93 \times 1.0996 \times 8.34^2 + 0.83 \times 2.6612 \times 8.34 = 854.38 \text{ t}$

② 弯矩 $M_{max} = q \cdot f \cdot (g_r - a) + p \cdot l \cdot (g_r - a)$

自表1查得： $g_r = 0.5559r$ ， $g_r = 0.7298r$ ， $a = 0.2378r$ ； f 、 l 值同前，代入上式

得 $M_{max} = 335.96 \times (0.5559 - 0.2378) \times 8.34 + 18.42 \times (0.7298 - 0.2378) \times 8.34 = 2293.34 \text{ t} \cdot \text{m}$

(4) 正曲率影响计算

地应力集中影响半径

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\sum(q+p)}{1.8083[R]}} = \sqrt{\frac{2431.92}{1.8083 \times 18}} = 8.64 \text{ m}$$

且大于8.38m应为第

一状态。

各处应力及荷载指标等，按式(11)、(12)计算

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 + \sigma_2 &= 18 \text{ t/m}^2 \\ \sigma_1 + (1 - \frac{4}{3\pi}) \sigma_2 &= \frac{2431.92}{\pi r^2} = 11.13 \text{ t/m}^2 \end{aligned} \right\}$$

可得 $\sigma_1 = 1.81 \text{ t/m}^2$, $\sigma_2 = 16.19 \text{ t/m}^2$

$$\left. \begin{aligned} q_1 + q_2 = q = 10.93 \text{ t/m}^2 \\ \sigma_1 + q_1 = 1.81 \text{ t/m} \end{aligned} \right\}$$

可得 $q = 1.81 \text{ t/m}^2$, $q_2 = 9.12 \text{ t/m}^2$

便由式(14)可求得正曲率影响下最大弯矩

$$\begin{aligned} \text{为 } M_{\dots} &= 1.9999 \times 8.34^2 \times 0.83 + 0.6667 \times 8.34^3 \times 9.12 - 0.2739 \times 8.34^3 \times 16.19 \\ &= 1070.21 \text{ t}\cdot\text{m} \quad (\text{正弯矩为基顶受拉}) \end{aligned}$$

(5) 负曲率影响计算

地应力集中影响半径

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\Sigma(q+p)}{1.3333[R]}} = \sqrt{\frac{2431.92}{1.3333 \times 18}} = 10.07 \text{ m}, \text{ 且大于 } 8.34 \text{ m 应为第一状}$$

态。

按式(15)、(16)计算各应力及荷载指标

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 + \sigma_4 = [R] = 18 \text{ t/m}^2 \\ \sigma_3 + \frac{4}{3\pi} \sigma_4 = \frac{\Sigma(q+p)}{\pi r^2} = 11.13 \text{ t/m} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} q_3 + q_4 = q = 10.93 \text{ t/m}^2 \\ \sigma_3 = q_3 \end{aligned} \right\}$$

可得, $\sigma_3 = 6.06 \text{ t/m}^2$, $\sigma_4 = 11.94 \text{ t/m}^2$,

$$q_3 = 6.06 \text{ t/m}^2, q_4 = 4.87 \text{ t/m}^2,$$

于是由式(18)可得负曲率影响下最大弯矩

$$\begin{aligned} \text{为 } M_{\dots} &= 1.9999 \times 8.34^2 \times 0.83 + 0.6667 \times 8.34^3 \times 4.87 - 0.3927 \times 8.34^3 \times 11.94 \\ &= -721.04 \text{ t}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

负弯矩说明力矩方向与荷载作用方向相反,即使基顶受压,基底受拉。

(6) 配筋计算^[3]

按混凝土标号200号、钢筋II级计算主筋

a. 悬面积受荷抗弯主筋(基顶受拉)

筏基计算宽度查表1得

$$b = 2h = 2 \times 0.9713 \times 8.34 = 16.23 \text{ m} = 162.3 \text{ cm}$$

筏基有效高度

$$h_0 = 200 - 5 - 3 = 192 \text{ cm} \quad (\text{5和3为筏基下和上毛面高})$$

$$A_0 = \frac{K \cdot M}{b \cdot h_0^2 R_s} = \frac{1.4 \times 2293.34 \times 1000 \times 100}{1623 \times 192 \times 192 \times 140} = 0.038$$

$$A_s = \xi \cdot b \cdot h_0 \cdot \frac{R_s}{R_s} = 0.04 \times 1623 \times 192 \times \frac{140}{3400} = 513.2 \text{ cm}^2$$

用84根 $\phi 28$ 钢筋,得 $A_s = 517.23 \text{ cm}^2$

b. 正曲率影响时抗弯主筋(基顶受拉)

附加弯矩 $M_{\dots} = 1070.21 \text{ t}\cdot\text{m} < 2293.34 \text{ t}\cdot\text{m}$,故不再增加抗弯主筋。

c. 负曲率影响时抗弯主筋 (基底受拉)

筏基有效高度 $h_0 = 200 - 5 - 3 = 192 \text{ cm}$

筏基计算宽度

$$A_0 = \frac{1.4 \times 721.04 \times 1000 \times 100}{1668 \times 192 \times 192 \times 140} = 0.011$$

$$A_s = \xi \cdot b \cdot h_0 \cdot \frac{R_s}{R} = 0.011 \times 1668 \times 192 \times \frac{140}{3400} = 145.06 \text{ cm}^2$$

用24根 $\phi 28$ 钢筋, 得 $A_s = 147.83 \text{ cm}^2$

d. 弯曲应力作用下斜截面抗剪计算

斜截面具有抗剪强度

$$\begin{aligned} [Q] &= 0.07 R_s \cdot b \cdot h_0 = 0.07 \times 110 \times 1620 \times 192 \\ &= 2395008 \text{ kg} \approx 2395 \text{ t} \end{aligned}$$

最大弯矩作用时的切力:

$$KQ = 1.55 \times 854.38 = 1324.3 \text{ t} \quad KQ < [Q] < 2395 \text{ t}$$

故仅按构造配置抗斜剪钢筋即可。

为节约篇幅, 其他计算、筏基配筋图等从略。

五、储油罐基础可调倾度的设计

1. 可调倾度原理

油罐在采动期间发生倾斜, 是由于基础下的地基土体, 产生了不均匀下沉所致。如前所述, 当油罐位置选定在预测采动盆地的主剖面中心线上时, 地表下沉稳定后, 其最终下沉仅为垂直下沉。但在地表最终稳定之前的一段时期 (一般为1~2年⁽²⁾) 盆地范围内的地表, 都要经历正曲率、倾斜、负曲率等变形影响, 而使油罐基础产生不均匀下沉, 导致油罐发生倾斜。如此, 罐体倾斜成为不可避免的过程。

今设在基底以下, 造成某种人为下沉。先使下沉方位为预期方位, 使基础产生反向的不均下沉, 再使下沉量为预期数值, 使基础获得相当于均匀下沉的最终效果, 则油罐的倾斜, 便得以调整。使基础获得均匀下沉最终效果的预期下沉值, 可以通过多种工程措施获得。现介绍“高压水冲砂垫层”法。

仿照建筑施工技术中“砂靴”的实践, 于基础下设置能够控制容积、防止随机流散的砂垫层构造。于预期方位, 引出一定体积的砂粒, 形成基底部分悬空面积, 造成地基应力与基础荷载之间的人为偏心, 而产生倾覆力矩, 使基础获得偏心倾侧变位。

随着对悬空面积大小及形状的控制, 倾侧变位的大小也便得以左右。于是, 以人为控制下沉量, 使基础获得均匀下沉最终效果的预期下沉值。

参考砂基液化的研究成果⁽⁴⁾, 对砂土的选择应注意下列问题:

- (1) 均匀级配的砂土, 易于流动, 则应选用不均匀系数小于5~6的砂土;
- (2) 粒径较小的砂土, 易于流散, 故应使用细砂。无细砂时使用中砂, 而不使用粗砂;
- (3) 饱和状态的砂土易于流动, 自基底下向外引出砂粒时, 可先考虑增加含水量的技术

措施。

2. 可调倾度的工程措施

为能实现有控人为下沉，本油罐筏基采用了如下一些措施：

(1) 整体筏形基础 用以平衡采动期间因地表不同变形而引起的各种不同应力，确保上部罐体的安全及正常运行。筏基的设计，即如前述。

(2) 基础下砂垫层 充分利用砂土内聚力极微、剪切强度极低的特征，易于流散而形成人为下沉。

垫层的厚度，应能容纳预测最大倾斜值发生时，基础边缘不均匀下沉量所需的高度。当以 δ 表示砂垫层厚度时，可用下式估算：

$$\delta = D \cos \theta \operatorname{tg} \theta \quad (19)$$

式中 D ——基础直径；

θ ——预测地表倾斜变形角。

今已知： D 为16.68m， $\operatorname{tg} \theta$ 为28/1000。

则 $\delta = 16.68 \times 0.9996 \times 0.028 = 0.47 \text{ m}$

考虑到罐址下尚有 D 、 F 、 G 等煤层组存在，有多次调斜的需要，故采用基底中央部分为40cm厚，基础边缘部分则可有80cm厚。

(3) 建立观测点 于基础顶面沿周边均布设置8个测点，相对的两点连线应过圆心。

并在罐区地面设置临时水准点，与库区水准点联通，以便监测倾斜发展和调整效果。

(4) 设置围护圈梁 为控制垫层砂粒不使随意流散，以便施行有控排砂，于基础下沿周边外，设置钢筋混凝土圈梁。

这时，砂垫层施加给圈梁的作用力，可视为有超载的松散无粘性土对圈梁的主动土压力 E_0 。由于这一存在状态，符合库伦理论的假设条件⁽⁵⁾，故可有如图16的受力状态。

$$\left. \begin{aligned} E_{.1} &= \frac{1}{2} r h^2 \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \\ E_{.2} &= \frac{1}{2} r (h + H)^2 \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中 H ——圈梁高度；

h ——当量高度；

即

$$h = \frac{q}{r}$$

q ——基础底面平均压强；

r ——砂土容重；

φ ——砂土内摩擦角。

当为中砂压密状态时可取 r 为 1.8 t/m^3 ， φ 为 35° 。

将圈梁视作无底圆柱筒容器，则所受环向拉力，可作如下分析，如图17所示计算草图。

今取圈梁单位高度，承受平均侧压力 E_0 。

$$\text{则} \quad 2T_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} E_0 \cos \theta dl = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} E_0 \cos \theta (R d\theta) = 2E_0 R$$

$$\text{已知: } E_0 = \frac{1}{2} (E_{.1} + E_{.2}), \quad R = \frac{1}{2} D, \quad T = T_0 H$$

得
$$T = \frac{1}{4}(E_{.1} + E_{.2})D \cdot H \quad (21)$$

式中 D ——圈梁内壁计算直径，
其余符号同前。

今既知： r 为 1.8t/m^3 ， φ 为 35° ， H 为 0.8m ， q 为 11.13t/m^2 ；可有当量高度 h 为 $11.13/1.8 = 6.18\text{m}$ 。

于是
$$E_{.1} = \frac{1}{2} \times 1.8 \times 6.18^2 \times \text{tg}^2 \frac{45^\circ - 35^\circ}{2} = 9.3 \text{ t/m}$$

$$E_{.2} = \frac{1}{2} \times 1.8 \times (6.18 + 0.8)^2 \text{tg}^2 \frac{45^\circ - 35^\circ}{2} = 11.9 \text{ t/m}$$

环向拉力 $T = \frac{1}{4}(9.3 + 11.9) \times 16.68 \times 0.8 = 70.7 \text{ t}$

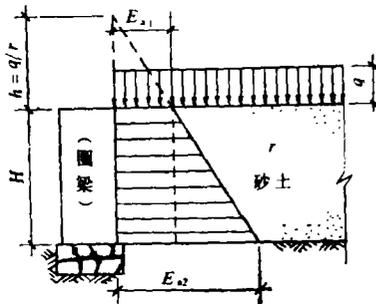


图 16 围护圈梁及其受力状态

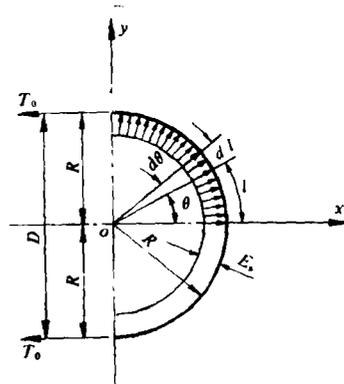


图 17 圈梁环向拉力

3. 工程实例主要步骤 (概述)

(1) 选定出砂洞口位置及常压排砂 据基础顶面测点观测值，确定罐基南侧的最高点下为出砂洞口的平面位置，见图 18。便自圈梁以下，挖开 $1200 \times 1500\text{mm}$ 洞口，做为出砂口。

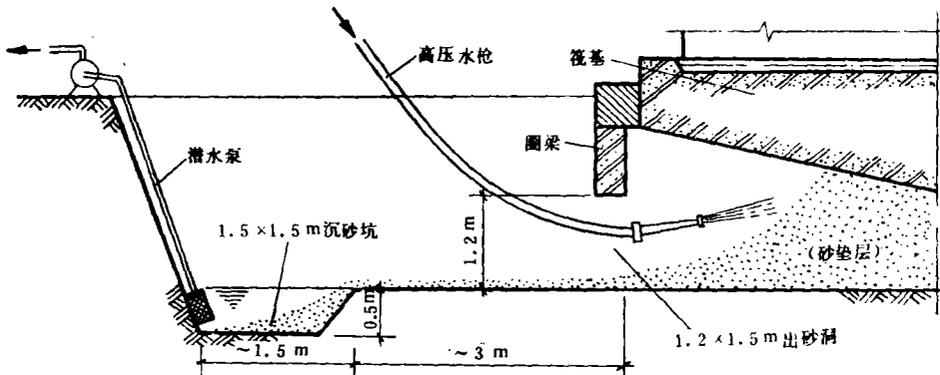


图 18 高压水冲砂垫层工艺剖面草图

(2) 高压冲水泄砂 采用油库自备消防用高压水枪，以泵房表压 8kgf/cm^2 ，现场水

压 0.5kgf/cm^2 的压强，先后四次，沿基础底面向基底纵深喷射，使基础底面与砂垫层之间出现 $50\sim 100\text{mm}$ 间隙，形成基底悬空面积。余砂由洞口随水排出，积于沉砂坑内。

各次高压水冲泄砂后，形成的悬面积和对应的倾斜值变化等等，如图19所示。

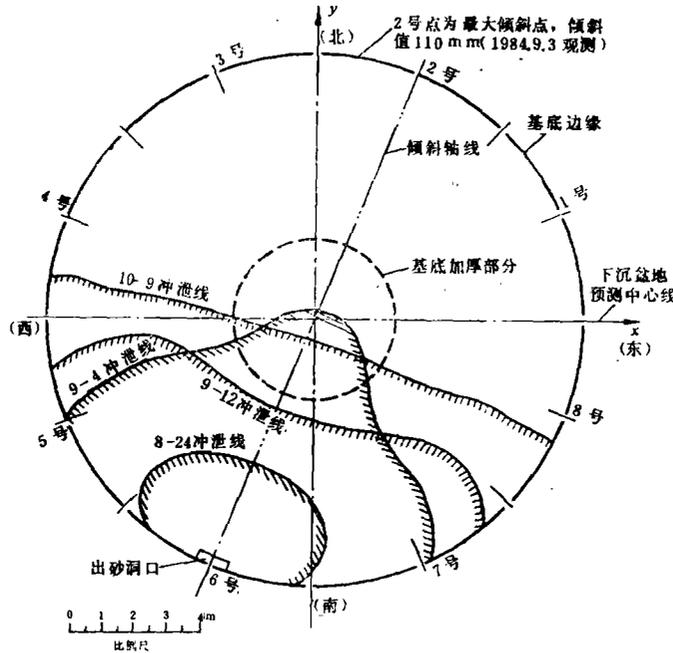


图19 4号储罐基底悬空面积平面示意图

(3) 回填砂垫层 经过前述调整措施，使油罐倾斜逐渐减少接近预期限值之时，便开始回填措施。

a. 人工回填：大面积基底回填，每虚铺砂 $10\sim 15\text{cm}$ ，用木拍板夯实，与基底面斜交部分，用木杆捣实。

b. 水砂充填：出砂洞口高度以上，利用圈梁与基础的间隙，用前叙消防水枪冲砂回填密实。出砂洞口的封堵措施，如图20所示。

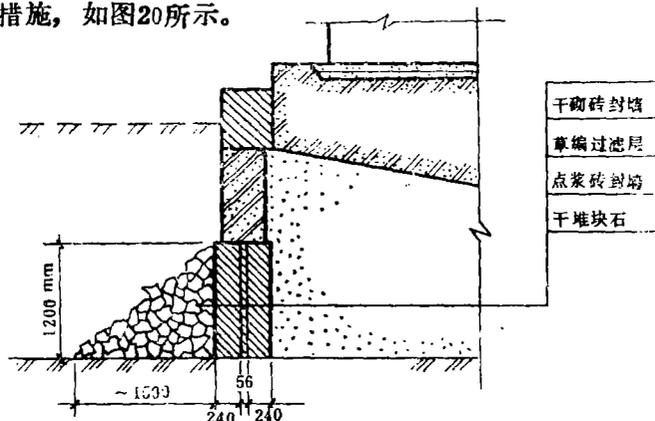


图20 出砂洞口封堵构造

(4) 充水试压 为改善基底垫层的不均度，提高调整效果的稳定度，在完成上述措施后，分四次向罐内充水。每次加压的水头为 $2\sim 2.5\text{m}$ ，间歇时间48小时。

(5)调整成果评述 本试点罐经过倾度调整后,测得其稳定的最大倾斜值 σ_{max} 为 $40\text{mm}<50\text{mm}$;

罐基直径两端测点间距离 D_0 为 15680mm ,则此时油罐稳定的倾斜度为:

$$\frac{\sigma_{max}}{D_0} = \frac{40}{15680} = 0.255\% < 1.0\%$$

上叙成果,符合《石油库管理制度》(81)商燃字第28号文颁发第八章第五十一条,《石油储运手册》商业部燃料局1957年颁发第三条第三款的规定(该规定都要求:油罐倾斜不得大于1%;绝对值不得大于50mm)。

调整后的油罐,已进行了前后17天的充水试压,最后7天仅发生1mm的恢复变化,可以认为趋于稳定且偏于安全。

六、结 语

1.为改善筏基在采动过程中的受力状态,确保油罐的安全和正常使用,本工程还采用了以下辅助措施:

(1)于基础顶面设置了砂垫层和沥青砂垫层各10cm厚,使油罐底板与基础顶面为安全的平面柔性接触,防止罐基倾斜过程中对油罐底板产生局部应力集中。

(2)在罐基顶面沿油罐周边,预埋了8个 $\varnothing 25$ 螺栓,通过油罐底8个外伸板的椭圆孔,用螺帽固紧,防止油罐倾斜过程中发生滑移,并防止意外水平作用力可能引起的滑移。

(3)据地质报告表明,库区位于山麓第四纪冲积坡积层上,主要地层为卵石夹砂质粘土、卵石夹灰粘土等等,全区冲积层厚约40m左右,下覆煤系地层。而现场踏勘,砾石、弧石粒径 $2\sim 80\text{cm}$,个别 100cm 以上,无规律(因系山前坡地,不可能形成积水洼地)。

由于地表有大量砾石及弧石埋存,将在较大程度上破坏地表变形的连续性和平缓性,形成局部凸起或陡陷,对筏基造成不规则顶托,不规则应力集中。故在砂垫层以下1m以内,将砾石及弧石清除,再用石屑(松散土)回填。

2.由于筏基倾度是可调的,便能保证上部油罐始终在规定倾度限度范围内工作。如此,罐体即可按常规方法安装施工。而输油输水等管路系统,则采用诸如活节头、蛇形软管、 Π 形胀缩节、伸缩支架等等常规技术措施,便足以适应地表变形的影响。

3.为节约基础用料,减轻自重,可考虑采用中空箱形的可调筏基。其内力分析方法,将另文详述。

为减少上部油罐因罐体倾斜而产生的附加应力,曾提出过“可调支架的球形储罐”设想方案。因当时当地施工条件所限,未能采纳。窃以为这也是解决在下沉盆地内兴建储油罐问题的途径之一。

4.在采空区上兴建石油储罐,目前尚无先例可鉴。通过多次工程实践和技术经济论证,认为该基础设计是成功的。

考虑到全国煤矿城市众多,其采空区十分广袤,如何科学地利用这些下沉盆地,为节约城市用地多辟途径,将越来越有其现实意义。

一次混油事故的教训

王 兴 伯

(黑龙江省密山县农管局物资供应站)

1984年10月,辉崔油库发生了一起汽油、柴油相混事故。在一个卧式油罐里有汽油21761 l,混进柴油23469 l,混油后从罐里冒出油230 l。事故发生后,经现场检查:汽油罐阀门有半圈没关到底,柴油管道上阀门是为给农场第二车灌装柴油时打开的,从阀门打开到事故发生不到一小时,不可能混进20多吨柴油。混油的原因分析如下:

这个库是汽油、柴油供应库,有油罐11个计5100m³,输油管道两条。在事故发生前,汽、柴油共用一条管道。由于管道的混用,给油料带来严重的恶果,一是降低了汽油、柴油的品质;二是给混油事故创造了条件。如接卸油时,每更换一次油品,管道里就存积混合油1600 l,灌装油时,每更换一次油品,管道里就积存混合油140 l。当时给用户发的汽油、柴油,有时是混合油。

汽油罐阀门没关到底的原因:油罐装油时,没有清洗,罐底有杂质,收发油时,杂质来回游动,有时沉淀到阀座底槽,阻碍阀门的关闭。

汽油罐里混进柴油的过程:柴油装在立式罐里,汽油装在卧式罐里,两个油面相差7m,只要开启柴油阀门就会往汽油罐里混油,天天发柴油,天天往汽油里混,到第7天时,油已混满,冒到地面,才发现混油事故。

这次混油事故的教训表明:柴油和汽油不能混用一条管道;油罐必须按要求清洗方能投产使用。

参 考 文 献

- (1)煤炭部北京开采研究所编:《煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用》,煤炭工业出版社
- (2)中国矿业学院、阜新矿业学院、焦作矿业学院编:《煤矿岩层与地表移动》,煤炭工业出版社
- (3)《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10-74)
- (4)南京大学地质教研室编:《工程地质学》,地质出版社
- (5)华南工学院等四院校编:《地基及基础》,中国建筑工业出版社