

海洋管道

土壤液化及其对海底管道的影响

翻译: 张建萍 校对: 施 奈
(中国海洋石油工程设计分公司) (管道职工学院)

TE 973-4

摘 要 当某些类型土壤受到冲击荷载(例如地震)作用时,会产生土壤液化。如果液化产生,土壤会在短时间(可能几秒钟)内呈高粘流体状。如果埋设在产生液化土壤中的管道,其单位长度的自重不等于排开的液化土壤的单位长度的重量,管道就会不稳定,有上浮或下沉的趋势。随着管道的变位,除已存在的运行应力之外,会在管中附加引起管道弯曲和拉伸应力。为了确定在土壤液化过程中管道悬跨的挠度和有效应力进行了参数分析,分析包括混凝土加重层厚度、土壤总单位重量及管道内介质比重的范围。管道沿途所遇到的任何可能液化的土壤的总单位重量,必须以详细的土壤勘测数据为依据确定。悬跨长度和挠度的结论必须当时作出。

主题词 水下管道 土壤 液化 应力 应力分析 土壤液化, 输油, 油管

1. 液化过程中的土壤性状

液化是一个术语,用来描述某些类型的土壤失去其强度且呈高粘流体状的一种现象。饱和的、疏松的、细颗粒到中等颗粒的粉土和砂土在冲击荷载下是最易引起液化的土壤类型。这些土壤类型的特征是均匀的粒径分布,圆形的土壤颗粒及呈一种密实的松散状态。

液化可能由地震、波浪作用或其他种类的动力荷载致使地基振动而产生。在饱和土壤中,冲击荷载引起振动,使得土壤密实,因此增加了土壤颗粒之间孔隙水的压力。如果孔隙水不能足够快地排出,则孔隙水的压力将增加到超出正常的静水压力。此刻该土壤瞬间液化并丧失其强度。

如果地基振动引起下卧层液化,那么土

壤的上层也能产生液化。在下卧层中的过大的孔隙压力使孔隙水流向孔隙水压力较低的区域。这将形成“流砂”或表层的液化状态。

2. 液化过程中管道的性状

如果管道埋设在产生液化的土壤中,它将变成一种受两种力(重力和由于排开液化土壤而产生的浮力)作用的无支承悬跨。管道充满气、油或凝析液后的自重,与排开液化土壤的重量之间的差别会引起管子的上浮或下沉。当管重与所排开的液化土壤重量相等时,管子将中心浮起并维持在原位。

如果管子上浮或下沉,由于非液化土壤中的那部分管子阻止悬跨两端的垂直或轴向移动,使管道产生轴向拉伸。此轴向拉伸和管道的弯曲刚度阻止悬跨的挠曲。图1为管道通过液化土壤区中的情况及管道可被模拟为

一根简支梁,承受横向于其长度的均布荷载 及在两端被约束位移的情况。

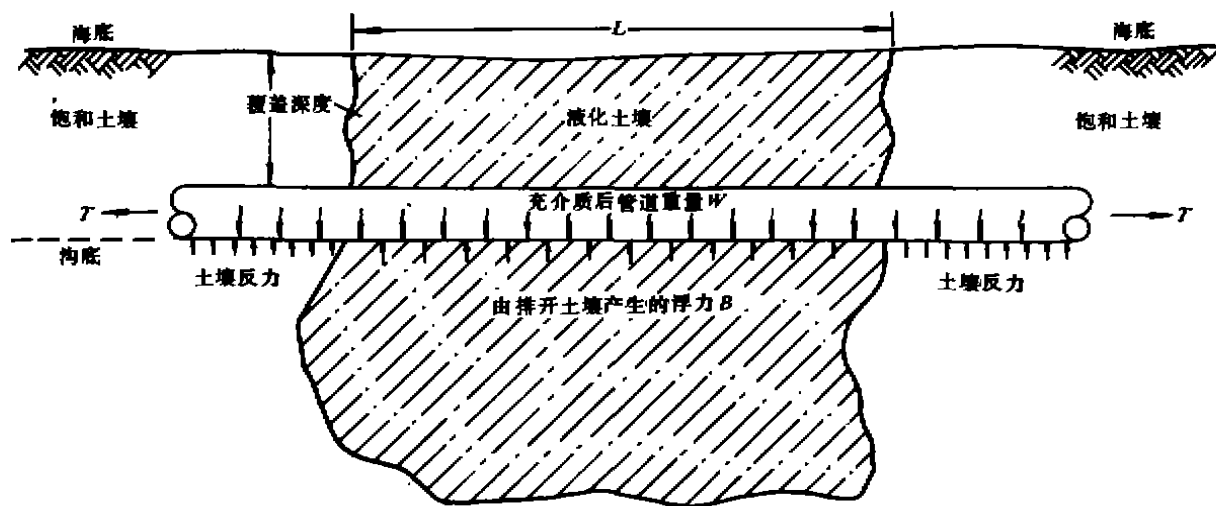


图 1 土壤液化过程中的管道

当 $W > B$ 时,管道下沉;当 $W < B$ 时,管道上浮;当 $W = B$ 时,管道不变位

3. 土壤液化过程中产生的管道应力

管道中由于纵轴向和张拉荷载引起的最大应力:

$$\sigma_{\max} = \frac{T}{A} \pm \frac{M_{\max} \frac{D}{2}}{I}$$

$M_{\max}$ 和 T 由下列方程求出 $Y_{\max}$ 值后确定,

$$Y_{\max} + \frac{A}{4I} Y_{\max}^3 = \frac{5qL^4}{4\pi^2 EI}$$

一旦确定了 $Y_{\max}$, T 即可用下式求出,

$$T = \frac{\pi^2 EA}{4L^2} \cdot Y_{\max}^2$$

没有轴向拉力时在简支梁中心的最大弯矩按下式计算:

$$M_{\max} = \frac{qL^2}{8}$$

附加轴向拉力后会阻止达到该最大值,所以,当存在轴向拉伸时,最大弯矩计算如下:

$$M'_{\max} = M_{\max} \cdot C_p$$

校正系数 C_p 可根据 $\sqrt{PL^2/EI}$ 的值,从参考文献 1 中查到。最大应力公式改写为:

$$\sigma_{\max} = \frac{T}{A} \pm \frac{M'_{\max} \frac{D}{2}}{I}$$

DnV“海底管道系统规范”指出,管道在运行中的有效应力不应超出规定的钢材最小屈服强度(SMYS)的 72%。有效应力 σ_{eff} 计算如下:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_a^2} - (\sigma_L \cdot \sigma_h)$$

4. 液化应力分析结果

液化应力分析结果适用于海底管道的下列两种情况:

(1) 管道在土壤液化产生前没有被埋设而铺放在海床上。如果土壤发生液化,仅在管子单位长度自重(包括所输介质重量——校者注)超过每单位长度排开的液化土壤的重量时,将产生变位(均布荷载是正值);而均布荷载为零或负值时,管子将不受土壤液化的影响。

(2) 管道埋设在能够产生液化的土壤中。当产生液化时,管子将趋于变位,除非均布荷载等于零。

均布荷载取决于管子外径、壁厚、混凝土

加重层厚度、管内介质的比重以及液化土壤的总单位重量。以 36 in(914 mm)原油管道

为例分析在悬跨长度范围及均布荷载作用下产生的应力及管子挠度(见表 1)。

表 1 土壤液化过程中作用在管道上的最大和最小均布荷载

管子公称外径 in	管子壁厚 in	加重层厚 in	管中介质 比重	满管自重 lb/ft	土壤总单位重量 lb/ft ³	均布荷载 lb/in
36	0.75	5.00	0.89	1493	90	+37.9
36	0.750	2.25	0.70	923	120	-12.6
36	0.688	3.00	0.89	1108	90	+20.2
36	0.688	1.90	0.70	844	120	-16.1

混凝土加重层厚度代表着为保证海床上管道稳定性所要求的最大和最小值。能产生液化土壤的总单位重量,希望在 90~120 lb/ft³(1440~1920 kg/m³)范围内,假定该管道用于输送比重分别为 0.89 和 0.70 的原油和凝析液。

从表 1 看出,当管道壁厚为 0.75 in(19.1 mm)时,均布荷载在 +37.9~-12.6 lb/in(+667~-225 kg/m)之间变化;当壁厚为 0.625 in(15.9 mm)时,均布荷载在 +20.2~-16.1 lb/in(+361~-288 kg/m)间变化。为确定液化悬跨长度,进行了一次参数分析。在该长度下管内产生的有效应力为规定的最小屈服强度的 72%,结果示于图 2,保守地假定所示的悬跨长度为挠曲的管道悬空保持在液化土壤中的长度。如果管道浮向海床表面,它会到达一个平衡位置,即管道底部在液化土壤中,顶部在水中。如果管道在平衡位置的有效应力没有超过 72%的 SMYS,那么这一液化悬跨长度可以超过表 2 中所示的值,而不会在管子上有超限的应力。

类似地,如果管道被埋设在薄薄的,有可能液化的土壤的上层,且有不会液化的下卧层土壤,则挠曲的悬跨可能受下层土壤的约束。由此悬跨长度可以超过表 2 所示的值,而不使管子应力超限。在土壤液化过程中,在被挠曲的管子中达到的有效应力,将取决于管子被约束以阻止其进一步移动之前所能够产生的挠曲量。

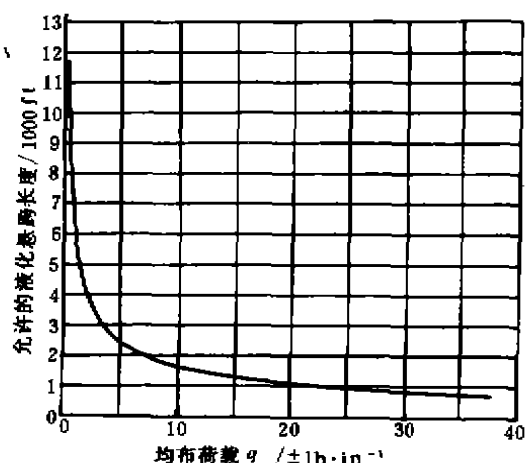


图 2 对外径 36 in,壁厚 0.75 in 管子,液化悬跨长度—均布荷载曲线

表 2 要求产生 72% 的规定的最小屈服强度的有效应力时的管道悬跨挠度

分布荷载 lb/in	36"外径×0.75"壁厚		36"外径×0.688"壁厚	
	悬跨挠度 ft	悬跨长度 ft	悬跨挠度 ft	悬跨长度 ft
±0.25	107	11700	104	11300
±0.5	83	8100	80	7800
±2	49	4000	47	3700
±4	35	2700	34	2600
±10	26	1550	25	1500
±20	18	1070	17	1020
±30	16	850	N. A. ⁽²⁾	N. A. ⁽²⁾
±40	12	700	N. A. ⁽²⁾	N. A. ⁽²⁾

管道沿途所遇到的任何可能液化的土壤总单位重量,必须以详细的土壤勘测数据为

依据来确定。悬跨长度和挠度的最终结论必须在当时作出。

5. 变量表

q —— 均布荷载, lb/ft;

T —— 轴向拉伸力, lb;

L —— 悬跨长度, ft;

W —— 充介质后的管道重量, lb/ft;

B —— 由于排开液化土壤产生的浮力, lb/ft;

$\sigma_{\max}$ —— 由于纵轴向和张拉荷载引起的最大应力;

A —— 钢管截面积;

$M_{\max}$ —— 最大弯矩;

D —— 管子公称直径;

I —— 钢管惯性矩(面积的二次矩);

$Y_{\max}$ —— 最大的管子挠度;

E —— 钢的弹性模量;

C_p —— 校正系数;

σ_{eff} —— 有效应力;

σ_h —— 环向应力, $\sigma_h = \frac{PD}{2t}$

σ_L —— 由于弯曲和轴向拉伸引起的最大应力;

P —— 管道内压;

t —— 钢管壁厚。

参考文献

- 1 Roark, R. J. and W. C. Yong. "应力和应变公式", 第 6 版
- 2 DnV. 海底管道系统规范. 1989 年

(收稿日期: 1994-11-05)

编辑: 康力平

(上接第 48 页)

然气流量。一只脉冲累计器与机械式或电子流量校正器配套使用, 采集各流量计的读数, 在利马办公楼一台记账 PC 机通过电话线路每日轮询该脉冲累计器。

记账 PC 机在 OS/2 下运行 PC 气体主机软件, 自动轮询各输气用户网点。该 PC 机具有 OS/2 软件的多任务能力, 特别适用于每日自动运行天然气流量的计划报表。

该项目实施的具体分工是, 西俄亥俄天然气公司负责投资购买设备; 而用户负责提供电话线路和电源。系统投产后, 作为一个大型管理设备, 不仅能提供所需的日常统计数据, 而且还提高了计量精度; 系统自投产后, 除个别电话线路出现小故障外, 一直运行可靠, 并未出现过系统故障, 从而受到了各输气用户的好评。

而在采用自动计量系统前, 该公司每月要派两人花 3 天时间到各偏远网点采集天然气计量数据; 按此计算, 每年需花费 36 个工日, 超出了一个月的工时。而如今, 节省下来

的劳动力可用于诸如维修等其他行业。

4. 监测

各用户采用美国流量计公司一套注册商标为 PC GAS CUSTOMER MONITOR 的附加软件模块随时采集各自的流量计读数, 以此掌握各自的耗气数据和潜在问题早期报警。该软件不仅可限制访问, 还可防止篡改存储在远端装置中的天然气公司的数据和参数。现在, 输气用户既可在他们认为适当时监测其天然气用量; 同时还可立即查出故障的位置并迅速采取补救措施。

目前, 西俄亥俄天然气公司已与 93 个偏远网点联网, 并另有 7 个正在施工中。美国流量计公司提供 SCADA 系统的交钥匙安装, 同时提供系统的远程故障检修和抽查的跟踪服务。

译自《Pipeline & Gas Journal》1994 年 7 月

(收稿日期: 1994-11-15)

编辑: 康力平