大型油罐软土地基变形特性的研究

贾庆山
（上海高桥石油化工设计院，上海，201208）

提　要　在软土地基建造大型油罐，地基变形是工程设计中亟待解决的重要问题。本文利用在上海高桥炼油厂建造 2 台 5 万 m^3 油罐在充水预压期间多种项目的观测资料，就这个问题进行了分析研究，并包括变形特性的探讨，还提出了大型油罐软土地基不均匀沉降的控制标准的建议。

一　前　言

本油库工程为新建两座 $5\times10^4m^3$ 大型浮顶原油储罐，油罐区位于上海浦东新区凌桥，毗邻外高桥港区。该罐区天然地基承载力仅为 65kPa，而 $5\times10^4m^3$ 浮顶油罐设计要求地基承载力 250kPa。塑料排水板与碎石桩综合处理 $5\times10^4m^3$ 油罐软基后，其复合地基承载力为 120kPa，为减少不均匀沉降和加速地基排水固结，确保油罐安全生产，进一步采用充水预压法对复合地基进行加固。为了对综合处理后的油罐软基的加固效果作出评价，控制地基稳定，对油罐地基进行多种项目的观测，取得测试数据，以利研究油罐软基变形特性及其规律。

二　油罐地基变形观测与实测分析

地基变形项目观测包括：(1)油罐环形基础(或称环墙)边缘沉降；(2)罐底板变形；(3)环墙周围地表变形；(4)地基深层变形；(5)地基深层土侧向位移等五项。地基变形观测平面布置总图见图 1。

1．油罐环形基础边缘沉降

为了达到充水预压法加固油罐复合地基的目的，必须采用分级充水预压，实际充水分为 10 级，充水天数为 44 天，稳定天数 58 天。详见图 2。

从图 2 可看出，充水预压前虽然经过半年时间的沉降，但油罐地基沉降量的 70%左右是在充水预压期间产生的，这说明地基强度的增长主要是通过分级充水进行预压来达到。2#罐地基实测沉降值与理论计算也较为吻合。实测最大平均沉降量为 940 mm，放水后回弹量 24mm ,占最大沉降量的 2.55%。罐整体倾斜值 12.6mm<240mm(规范标准),罐周相邻点最大差异沉降为 8.1mm<26mm(规范标准)。详见表 1。

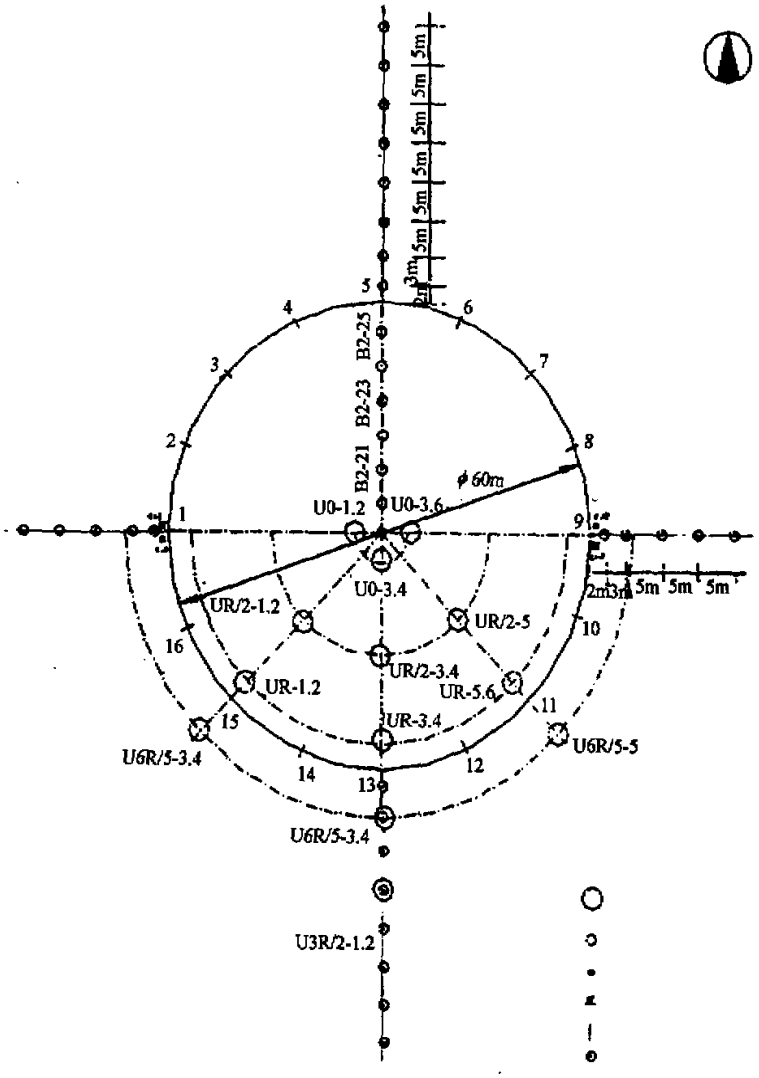


图 1　油罐地基变形观测平面布置总图

表 1　2#油罐基础边缘沉降量（mm）

最大平均沉降量	放水后平均回弹	最终平均沉降量	测点最终最大/小沉降量	对径上最大差异沉降	相邻点最大差异沉降
904.4	24.1	916.3	925.0/907.5	12.6	8.1

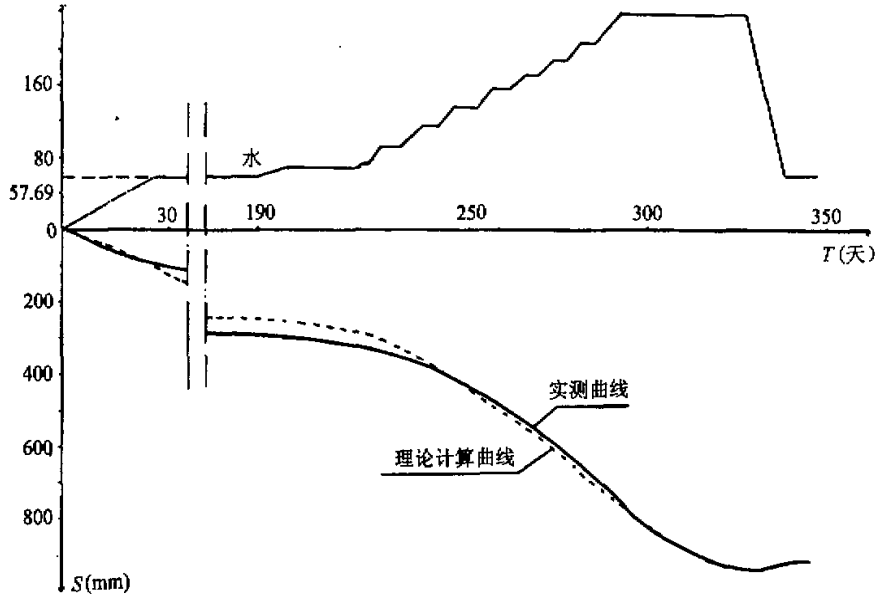


图 2　2#油罐地基的实测沉降值和理论计算对比曲线

2．环墙基础周围地面变形

在罐基充水预压过程中，通过观测边桩位移而取得地表土变形数据，罐周地表出现下沉，近罐的地表比远离罐的地表下沉大。在 L>20m(L 为离罐周的距离)的地表，整个充水预压过程中的沉降都很小。当 L<20m 时，沉降曲线变形较陡，当 L>20m 时，沉降曲线变得平缓了，即变形随距离衰减很快；地面隆起为地表变形的重要特征，2#罐周围地面首先在 L>23m 的地表出现隆起(水位高度量衡 37m)，随充水荷载增加，相继在于 3m 到 5m 的区域出现隆起。最大隆起出现在最后一级加荷结束的第 2 天，即满载恒压的第 2 天，最大累计隆起量为 9.8mm ,点位为 C4-6 边桩点(距离基础边缘 25m)，放水结束后的第 5 天，隆起现象还存在，隆起地表仍在缓慢沉降。经过一段时间后，趋于稳定。

2#罐基础周围地表变形实测值与计算值对比见图 3 及图 4。

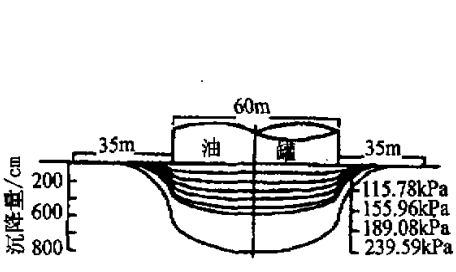


图 3　2#罐内外原地面的沉降

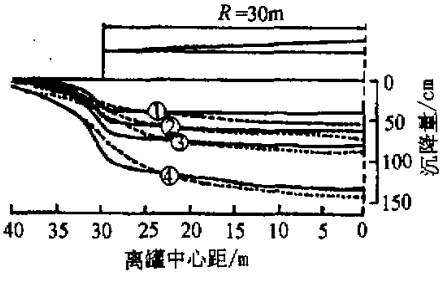
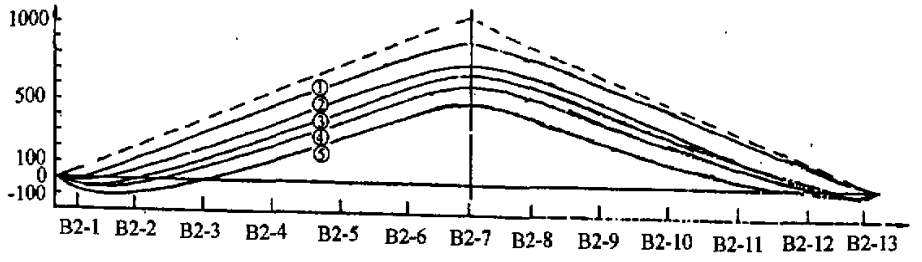


图 4　2#罐地面变形实测值与计算值比较曲线

3．油罐底板变形

为防止罐底板过大的不均匀沉降而形成“锅底形”，出现死油区，在充水预压前后对罐底板变形进行了观测，其罐基础锥面坡度实测值为 1.26%>0.8%(规范标准)。

2#罐底板变形在充水预压前后观测结果见图 5。



图中虚线为设计预抬高基础坡线

图 5　2#油罐充水预压前后罐底板变形曲线

4．地基深层土变形

在油罐地基充水预压过程中，在每级荷载下，对油罐地基沉层土的变形，用深层标沉降进行分层沉降观测。其深层土变形随荷载增加而增加，随深度的增大而减少；在同级荷载下，深层土变形随荷载作用时间的延长而增大；深层土的变形最大值发生在深度 3m 左右，而不是发生在地表。标高 3m 以下的深层土符合一般土体固结的规律，可判定油罐基础的沉降是正常的。详见图 6。

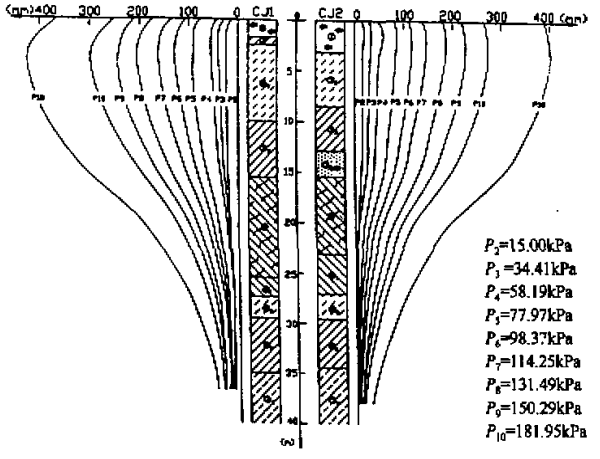


图 6　2#油罐深层土变形实测曲线

从 2#罐地基深层土变形沿不同压缩土层的衰减规律来看，0.58D (油罐直径)以下土层在各级荷载下深层标沉降值小于 4.7%；这说明地基土层直到扩散应力的作用，即存在一个应力影响区，在应力影响区以下土层的变形，显著减少；应力影响区的深度与荷载的大小关系不大，主要取决于基础面积、基础形式和土层的构造及其压缩性。这说明 2#罐地基

压缩层计算深度为 0.58D (约 35m)较为适宜。见图 7。

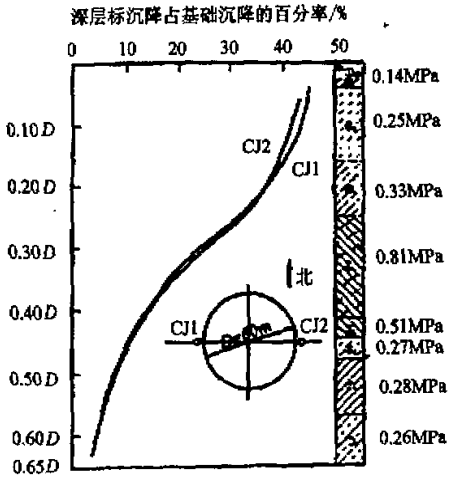


图 7　地基深层土变形沿不同压缩性土层的衰减规律

4. 地基深层土侧向位移

2#罐在充水预压期间，对地基深层土水平位移进行了观测，分级充水荷载下深层的水平位移变化规律：

深层土的侧向位移随充水荷载的增加而增大；充水荷载小于 150kPa 时，即土体在初始不排水与排水情况下，侧向位移为弹塑性变化规律；最大侧向位移发生在 Z=16.5m 处，即④层淤泥粘土层。碎石桩加固处理到 Z=15，桩底区域应力扩散最为明显，即为最大侧向位移点，也与该处软土层有关。加固区以下侧向变形曲线表明天然地基的土层较为均匀；地基土的侧向位移影响深度约为 36m。

2#罐地基深层土的侧向位移实测成果曲线见图 8。

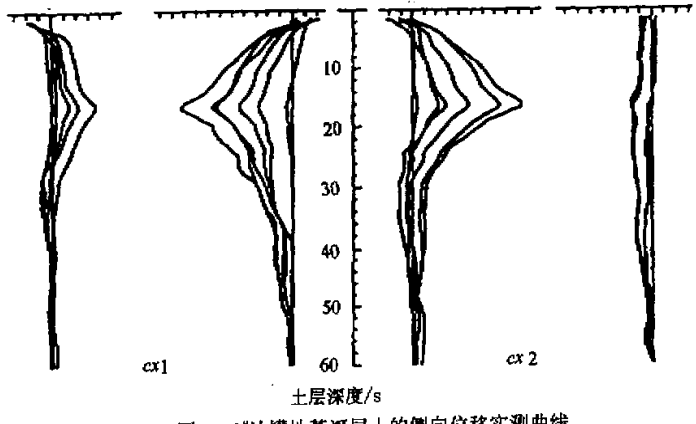


图 8　2#油罐地基深层土的侧向位移实测曲线

三　油罐地基不均匀变形控制标准

在软土地基上建造大型油罐，会产生沉降和不均匀沉降，过大的不均匀沉降会影响油罐的正常使用，甚至发生事故。因此油罐地基不均匀沉降必须小于生产安全使用的控制标准。油罐地基变形特征可分为罐基沉降量、罐基整体倾斜(平面倾斜)、罐基周边不均匀沉降(非平面倾斜)及罐中心与罐周边的沉降(罐基础锥面坡度)。

1．罐基础整体倾斜(平面倾斜)

平面倾斜为罐基不均匀沉降的一种典型模式，由于地基不均匀沉降而产生的罐体倾斜，过大的平面倾斜将改变液面形式，增加罐壁的附加应力，使罐壁发生径向扭曲而引起浮顶失灵，甚至发生罐体倾倒事故。罐基础整体倾斜是通过基础边缘的沉降观测点来控制的。2#罐基础不均匀沉降观测结果见图 9 和表 2。

从表 2 和图 9 可知，2#罐的整体倾斜值为 $0.22\times10^{-3}<4\times10^{-3}$(现行国家行标对 $5\times10^{4}m^{3}$ 浮顶油罐的控制标准)。

表 2　2#油罐分级加荷下的平面倾斜值和非平面倾斜值

加荷级数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	放完水
D_{max} (mm)	27.9	28.2	26.7	23.5	20.0	18.6	17.1	16.2	14.3	13.2	13.3
$K(\times10^{-3})$	0.46	0.47	0.44	0.39	0.33	0.31	0.29	0.27	0.24	0.24	0.22
δ_{max} $(\times10^{-3})$	0.56	0.59	0.51	0.44	0.46	0.53	0.62	0.70	0.72	0.77	0.71

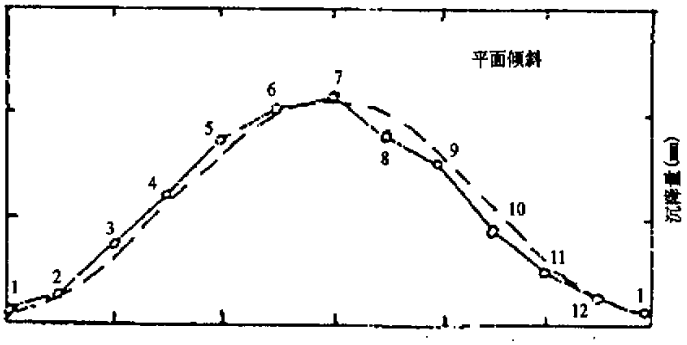


图 9　2#油罐的非平面倾斜

2．罐基础周边不均匀沉降（非平面倾斜）

罐基础周边不均匀沉降是产生罐壁应力和椭圆度的主要因素，椭圆度过大将影响浮顶自由升降，甚至造成油罐事故。如罐基础沉降只有平面倾斜，而没有非平面倾斜的话，油罐基础沉降展开图将会是图 9 中虚线所示的余弦曲线，否则点位不会落在这条线上，在绝大多数的油罐地基充水预压中，罐周沉降曲线出现不止一个峰和谷，表明非平面倾斜的普遍存在，反应出罐壁有扭曲变形。

从图 9 中可看出，2#油罐基础的不均匀沉降主要表现为非平面倾斜，即罐壁扭曲。

经统计得出 2#罐基础非平面倾斜为 $0.71\times10^{-3}<2.2\times10^{-3}$(现行国家行标对 $5\times10^{4}m^{3}$ 浮顶油罐的控制标准)。详见表 2。

3. 罐基础锥面坡度(罐中心与罐周边沉降)

油罐地基不均匀沉降，在充水预压过程中，并非按同一个平面倾斜或同一个非平面倾斜模式进行，而是一个摇摆下沉的过程。2#罐在径向罐周两点的沉降差随时间和荷载的变化而变化，径向罐周两点最大差异沉降方向由 3~11 逐渐变为 2~14 方向，最后变到 7~15 方向上。

经统计得出 2#罐基础锥面坡度为 $i=11.98\times10^{-3}>8\times10^{-3}$ (现行国家行标的控制标准)。详见表 3。

表 3 2#油罐沉降量及参数值推算结果表

点位	最终沉降量 S_∞	瞬时沉降量 S_d	固结沉降量 S_c	α	β	沉降系数 m
基础边缘	1042mm	223mm	819mm	1.001	0.02848	1.27
罐中心	1400mm	358mm	101042mm	1.02	0.03850	1.34

四 结 语

1. 油罐软土地基变形特性

(1)油罐的间距

从罐基周边边桩移比实测资料分析表明，当罐基础边缘径向距离(L)与罐直径(D)之比，即 $L/D>0.42$ 时，地面隆起量不超过 1%。在软土地基上建造大型油罐，其油罐间的净距离为油罐直径(D)时，相邻油罐基础的影响可以不考虑，即油罐的间距为罐的直径(D)较为合理。

(2)油罐地基压缩层计算深度

从 2#罐地基深层土分层沉降观测成果表明，其地基深层土沿不同压缩土层的变形规律，在地表 0.58D (D 为油罐直径)以下土层在各级荷载下深层标沉降量小于 4.7%，这说明 2#罐地基压缩计算深度为 0.6D 较为适宜。

(3)油罐地基的侧向位移影响深度

在 2#罐充水预压期间，对地基深层土侧向位移观测表明，地基深层土最大侧向位移发生在 Z=16.5 m 处，即④层淤泥粘土层，这恰好为碎石桩加固处理深度，侧向位移影响深度为 36m 即为 0.6D (罐直径)，这说明油罐地基深层土侧向变形规律与地基深层标观测的规律完全一致。

2. 油罐地基不均匀变形控制标准

从油罐地基变形多种观测资料表明，其变形特征可分为罐基沉降量、罐基整体倾斜(平面倾斜)、罐基周边不均匀沉降(非平面倾斜)及罐中心与罐周边的沉降(罐基础锥面坡度)。2#罐基础地基不均匀变形，其观测结果为平面倾斜 $K=0.22\times10^{-3}<4\times10^{-3}$ (国家行标控制标准)，非平面倾斜 $\delta_{max}=0.71\times10^{-3}<2.5\times10^{-3}$ (国家行标控制标准)及罐基础锥面坡度 $i=1.98\times10^{-3}>8\times10^{-3}$ (国家行标控制标准)。以上三项控制指标均满足国家行标控制标准。

参考文献

[1] 贾庆山编著：《大型油罐地基处理》，中国石化出版社，1993。

[2] 贾庆山：《塑料排水板与碎石桩综合处理大型油罐软土地基的试验研究与工程应用》，载《石油炼制与化工》，1990年，第8期。

[3] 贾庆山：《大型油罐软土地基容许倾斜》，载《岩土工程学报》，V01.13№1，1991。

[4] 贾庆山：《油罐基础工程事故分析与处理》，载《特种结构》，V01.8№2，1995。

[5] 中华人民共和国行业标准：《石油化工钢储罐地基处理技术规范》，SH/T3083-1997.1997。

[6] 中华人民共和国行业标准：《石油化工钢储罐地基基础设计规范》，SH3068-95.1995。

[7] 中华人民共和国行业标准：《石油化工钢储罐地基与基础工程施工及验收规范》，SH3526-92.1993。

[8] 上海市工程建设规范：《地基基础设计规范》，DGJ08-11-1999.1999。