

# 大型储油罐碎石桩地基差异沉降有限元数值分析

刘红军<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 张志豪<sup>3</sup>, 王秀海<sup>1</sup>

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国石油冀东油田公司, 河北 唐山 063004;  
3. 中国石油天然气华东勘察设计研究院岩土工程公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:**为减少大型储油罐碎石桩地基差异沉降,采用轴对称有限元方法进行数值模拟和计算,研究了桩长、置换率、褥垫长度等参数对差异沉降的影响,及负向侧向位移与差异沉降的关系。结果表明,3个不等桩长的分布范围在某一定值时,差异沉降最小;油罐中心范围内复合地基,通过固定桩径不变,增加桩间距来增大置换率,可使复合地基在相对较小的置换率条件下获得更小的差异沉降;保持置换率不变,桩径越大(即桩间距越疏),复合地基差异沉降越小;调整桩长、置换率对差异沉降的改变较为明显,而改变褥垫长度对其影响不大;油罐地基负向侧向位移的出现是差异沉降调整的一个重要特征。

**关键词:**有限元法;差异沉降;复合地基;碎石桩

**中图分类号:**TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)05-0009-07

## FEM Analysis of Differential Settlement of Gravel Pile Foundation Under Large-scale Oil Tank

LIU Hong-jun<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-hao<sup>3</sup>, WANG Xiu-hai<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, P. R. China;  
2. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, Hebei, P. R. China;  
3. Geotechnical Engineering Company of CNPC Eastchina Design Institute, Qingdao 266071, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** In order to reduce the differential settlement of gravel pile foundation under large-scale oil tank, axisymmetric numerical simulation method and finite element method was employed to study the pile length, the exchange rate of length, the length of the cushion course to the influence of differential settlement and the relationship of negative lateral displacement and the settlement. It is found that: differential settlement has a minimum range of pile length. For the oil tank foundation center, by keeping the pile diameter, increasing pile spacing can increase the rate of exchange and obtain smaller differential settlement in relatively smaller displacement rate conditions. And by keeping replacement rate unchanged, the larger the pile diameter (namely the looser pile spacing) is, the smaller the differences settlement of the gravel pile foundation is. Moreover, pile length adjustment and the exchange rate have obvious effects on different subsidence and not obvious effects on the length of the cushion course. The appearance of oil tank foundation negative lateral displacement is one of the most important features of differential settlement adjustment.

**Key words:** finite element method; differential settlement; composite foundation; gravel pile

收稿日期:2009-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072216);山东省自然科学基金资助项目(Y2007E07)

作者简介:刘红军(1966-),男,教授,主要从事海洋岩土工程研究,(E-mail)pengherui@163.com.

在沿海软土地区建造了许多大型石油储罐,其中有很多采用了等桩长、同一置换率的碎石桩复合地基处理方案。实践表明,上述方案在地基中会产生较大的碟形不均匀沉降<sup>[1]</sup>,过大的不均匀沉降会影响油罐的正常使用,甚至发生事故。要减小油罐罐底沉降,特别是减小置有深厚软弱覆盖层地基上大型或超大型油罐罐底的过大差异沉降,仍就需要对油罐地基进行适当的处理,控制油罐的差异沉降在安全允许界限之内,以满足油罐正常工作要求<sup>[2]</sup>。因此,如何通过科学的设计来达到减少差异沉降一直是工程设计人员非常关心的问题。近年来,很多专家、学者在差异沉降方面做了大量研究<sup>[3-7]</sup>。金姆等人开展了高压缩性软弱粘土地基上油罐土工离心模型试验,探讨土工合成材料对差异沉降的影响<sup>[8]</sup>。陈龙珠用弹塑性有限元方法分析了变刚度复合地基处理方案对基础最大沉降、差异沉降等主要工程特性的影响<sup>[9]</sup>。黄斌用三维有限元方法研究在同一基础下采用不同桩型情况时各桩沉降和刚度的关系,探讨通过改变桩型来调整刚度,最后控制差异沉降的方法<sup>[10]</sup>。Horikoshi 用参数法和离心模型试验,证实了设置中部小群桩有可能使差异沉降可以忽略<sup>[11]</sup>。同时 Randolph 还研究了在存在软弱上层的某些地基中以长短桩结合的方式布桩的情况<sup>[12]</sup>。但对油罐碎石桩复合地基方面差异沉降的研究尚不多见。

该文以阿尔及利亚某地区油罐地基处理工程为依托,采用有限元软件 PLAXIS 建立碎石桩加固地基的有限元模型,对其进行弹塑性数值计算,通过与现场监测数据比较验证,在此基础上,对桩长,桩径、桩间距、置换率等参数的选择及其对差异沉降影响进行了有限元数值分析。

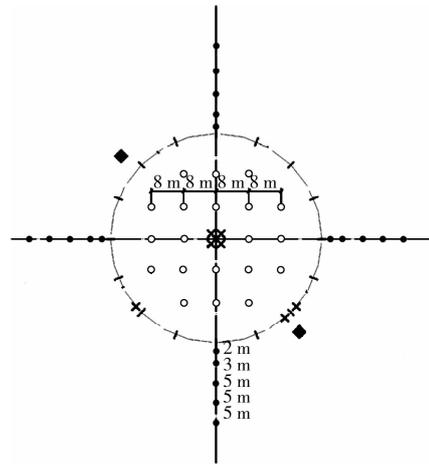
## 1 工程概况

阿尔及利亚 SKIKDA 500 万 t/a 凝析油项目 LOT1 区的厂址位于阿尔及利亚 SKIKDA 原化工区内。

阿尔及利亚 SKIKDA 500 万 t/a 凝析油项目 LOT1 区 304-TK-002 罐为石油罐。其地基处理采

用振动水冲碎石桩法,本罐共布置振动水冲碎石桩 1 189 棵,等边三角形布桩,桩间距 1 750 mm,中心部位为长桩、边部为短桩,桩长分别为 23 m、15 m。

碎石桩施工完毕后,进行了 5 组单桩复合地基静载试验,罐区桩间土静力触探检测,同时在碎石桩桩顶及桩间土埋设土压力计以观测桩土应力的变化规律。各项目监测布置示意图 1。



注:—环墙沉降监测点;×孔隙水压力监测点;○锥形变形监测点;  
◆深层土竖向位移监测点;●罐周围地表土位移监测点

图 1 监测布置图

## 2 有限元模型建立及模拟方法

大型油罐基础为圆形,可以使用轴对称模型进行平面二维有限元计算。试验段碎石桩按等边三角形布桩布置,进行平面二维计算时,需要进行合理的简化和等效。

### 2.1 材料模型

地基土和填土均采用 Hardening-soil 模型,为理想塑性本构模型,首先,它使用的是塑性理论,而不是弹性理论;其次,它考虑了土体的剪胀性;再次,它引入了一个屈服帽盖。该模型的计算参数可以从土样的基本试验里得到。地基土层资料及土工参数如表 1 所示,表中参数均是取自试验段勘察报告。混凝土环墙可视为均质线弹性体,采用线性弹性模型进行模拟。

表 1 土层参数表

土类名称	材料模型	厚度/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )	剪胀 角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比	弹性 模量/ kPa	割线 模量/ kPa	切线压 缩量/ kPa	卸载-再 加载模 量/kPa	模量应 力相关 幂指数	界面强 度折减 因子
素填土	Hardening-Soil	0.55	17	12	15	0	0.3	2 336	2 336	2 336	7 008	1	0.5
粘土	Hardening-Soil	1.7	18	5	15	0	0.32	2 398	2 398	2 398	7 194	1	0.5

续表 1

土类名称	材料模型	厚度/ m	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	粘聚力/ (kN·m <sup>-2</sup> )	内摩 擦角/ (°)	剪胀 角/ (°)	泊松比	弹性 模量/ kPa	割线 模量/ kPa	切线压 缩模量/ kPa	卸载-再 加载模 量/kPa	模量应 力相关 幂指数	界面强 度折减 因子
粉砂	Hardening-Soil	0.9	17	0.2	33	3	0.25		6 616	6 616	19 848	0.5	0.7
中粗砂	Hardening-Soil	3.2	17	0.2	33	3	0.25		6 616	6 616	19 848	0.5	0.7
粉细砂	Hardening-Soil	6	17	0.2	33	3	0.25		6 616	6 616	19 848	0.5	0.7
砾砂	Hardening-Soil	0.3	18	0.2	38	4	0.2		40 000	40 000	120 000	0.5	0.7
圆砾	Hardening-Soil		21	0.1	36	4	0.3		1.5×10 <sup>7</sup>	1.5×10 <sup>7</sup>	4.5×10 <sup>7</sup>	0.5	刚性
碎石桩	线弹性模型		19				0.3	2.8×10 <sup>4</sup>					
环墙	线弹性模型		24				0.15	3.5×10 <sup>7</sup>					

根据相关资料[13],计算时  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}, E_{sur}^{ref} = (2 \sim 4)E_{50}^{ref}$  (在实际计算时,卸载模量取 3 倍的加载模量),参数  $c, \varphi, \psi$  依据 Mohr-coulomb 模型的破坏模式。

为了模拟碎石桩与土的相互作用,其接触行为需要用接触面来模拟,具体方法:  $|\tau| < \sigma_n \tan \varphi_i + c_i$  时,接触面处于弹性阶段;当  $|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i$  时,接触面进入塑性阶段。这里,  $c_i, \varphi_i$  分别为第  $i$  层接触面的凝聚力和内摩擦角。这 2 个指标与每个土层的力学指标相联系,在程序中通过输入参数  $R_{inter}$  来进行计算。具体的计算方法如下:  $c_i = R_{inter} c_{soil}$ ,  $\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil}$ 。当接触面强度取为土体强度时,  $R_{inter}$  即接触面是刚性;当接触面为软弱或柔性时,设置  $R_{inter} < 1$ 。

2.2 碎石桩的简化

碎石桩桩采用线弹性模型,符合广义 Hook 定律,以实体元素模拟碎石桩。对于等边三角形布置的碎石桩,可将其等效成圆环,简化后的圆环长等于原桩长。等效模量可采用文献[14]的方法,假设图 2-3 中距中心  $R$  处的圆周上共有  $n$  根桩,可将这  $n$  根桩及桩间土组成的圆环看成是另一种均质弹性材料组成,若假定它们的轴向刚度等效,即可推得这种材料的弹性模量。由于桩间土的刚度较碎石桩要小得多,在此可以忽略不计。根据总刚度等效,推得圆环的等效模量为:

$$E' = E \cdot \frac{nA}{A'} \quad (1)$$

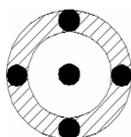


图 2 模量简化平面图



图 3 模量简化剖面图

式中,  $E$  为桩体的弹性模量;  $A$  为桩身的横截面积;  $A'$  为圆环的面积;  $n$  为桩数。

2.3 计算模型

综合考虑油罐的几何形状、中心对称性,建立如图 4 所示的有限元模型。油罐半径 26 m, 23 m 长桩分布半径: 0~13.66 m, 15 m 短桩为 13.66~32 m; 碎石桩位于地表以下 1 m, 其上 0.3 m 碎石垫层, 混凝土环墙高 2 m, 其内自上而下铺 0.4 m 砂垫层, 0.6 m 分层夯实填土; 罐基础顶面坡度 0.03。为了消除模型边界效应的影响,取建模边界宽度 130 m, 深度 70 m, 以满足计算沉降的需要。

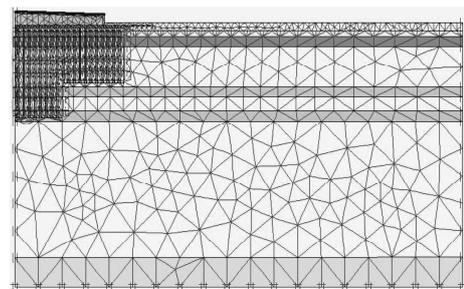


图 4 几何模型及网格剖分图

表 2 油罐底板参数表

	轴向刚度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	弯曲刚度/ (kNm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> )	等效厚度/ m
油罐底板	4 000 000	133	0.02

PLAXIS 软件提供了 6 节点单元与 15 节点单元, 本文选用 15 节点单元。

### 3 有限元计算结果与实测值对比

油罐地基总沉降量变化关系见图 5。从图 5 可以看出, 随着距油罐中心距离的增大, 总沉降值是逐渐减小的, 计算值与现场监测数据趋势相符, 并且与实测值相比, 沉降计算值误差最大的落于距油罐中心 16 m 处, 为 8.1%, 其它的依次为 2.9%, 5.5%, 3.3%, 4.3%。

罐地基周围表层土的垂直沉降变化曲线见图 6, 从图中可以看出, 计算值与监测值趋势基本吻合。

所以, 从整体上看, 计算沉降值与实测值是吻合的, 可进一步用于研究油罐碎石桩复合地基差异沉降。

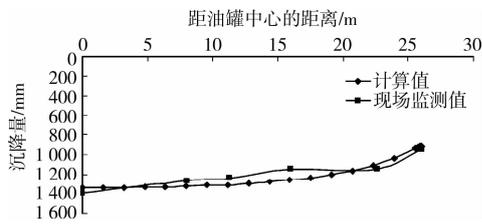


图 5 总沉降量变化曲线

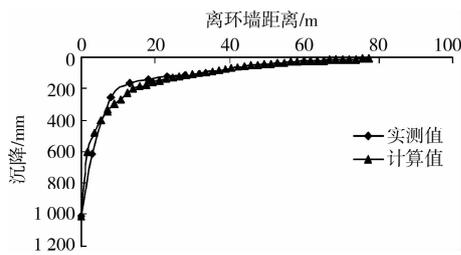


图 6 罐地基周围表层土的垂直沉降变化曲线图

### 4 各因素对差异沉降的影响

为研究各种因素对差异沉降的影响, 分别从不同桩长分布范围, 置换率包括因此随之改变的桩径、桩距, 罐基础褥垫等各个角度考虑, 最后对比各因素对差异沉降影响, 以寻求调整差异沉降的最佳途径。

#### 4.1 桩长的影响

为了达到减少差异沉降的目的, 在同一油罐碎石桩地基下铺设 3 种不同长度的碎石桩。因长度不同, 依次命名为长桩、中桩、短桩。先对碎石桩的分布范围进行计算分析, 再调节桩的长短以达最终目的。

分别考虑了不同上部荷载, 地基刚度的条件下, 桩长各因素对差异沉降的影响, 以便得出应用更加广泛的规律。

首先, 图 7 为在不同地基刚度 (20 kPa、100 kPa、200 kPa、350 kPa) 或不同荷载 (1 600 kPa、2 398 kPa、4 000 kPa、6 000 kPa、10 000 kPa) 时, 长桩布置范围变化时地基差异沉降的变化曲线。

从图中可以看出: 无论地基刚度和荷载如何变化, 油罐地基差异沉降随着长桩布置范围的变化, 都在距离罐中心 16.92 m (0.33 D, D 为油罐直径) 处形成一极小值; 软弱地基差异沉降受长桩布置范围变化的影响较大; 长桩布置范围变化对较大油罐荷载下的差异沉降影响效果较显著。

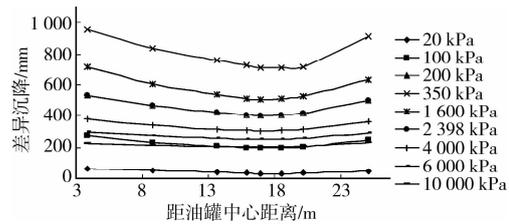


图 7 长桩布置范围变化时地基差异沉降的变化曲线

接着, 长桩分布范围 0~16.92 m 不变, 调节中桩分布范围。

图 8 为在不同地基刚度或不同荷载时, 中桩布置范围变化时地基差异沉降的变化曲线, 表 2、表 3 为相应的差异沉降最小时中桩分布范围。

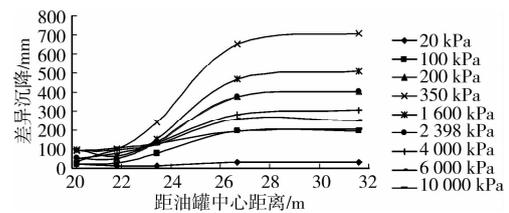


图 8 中桩布置范围变化时地基差异沉降的变化曲线

表 2 不同上部荷载时, 差异沉降最小的中桩分布范围

上部荷载/kPa	中桩分布范围/m
20	16.92~23.44
100	16.92~20.18
200	16.92~21.81
350	16.92~20.18

表 3 不同地基刚度时, 差异沉降最小的中桩分布范围

地基刚度/kPa	中桩分布范围/m
1 600	16.92~21.81
2 398	16.92~21.81
4 000	16.92~20.18
6 000	16.92~20.18
10 000	16.92~20.18

如表所示,无论地基刚度和荷载如何变化,油罐地基差异沉降随着中桩布置范围的变化,都在范围 16.92~20.18 m 或 16.92~21.81 m(即下限位于 0.39~0.42  $D$ ,  $D$  为油罐直径)处形成一极小值。由于碎石桩直径本身占有一定范围,因此,形成极小值范围的精确值不能确定。

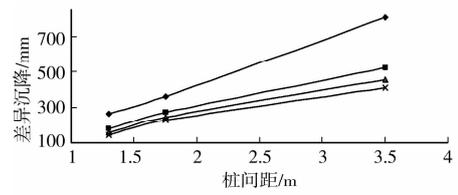
最后,长桩分布范围 0~16.92 m,中桩 16.92~20.18 m,调节中、短桩桩长,可得最小差异沉降:37 mm,远小于原工程监测值 470 mm。

### 4.2 桩体复合地基置换率的影响

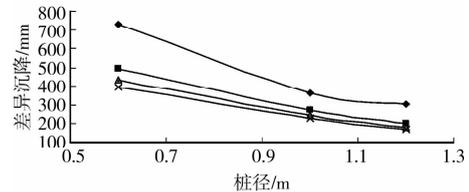
为研究桩体复合地基置换率对差异沉降的影响,以原设计为基准,通过分别分析中心范围内桩体的置换率变化和不变时差异沉降的变化规律,达到应用此规律减小差异沉降的目的。

首先考虑置换率改变。以桩径 1 m 和桩间距 1.75 m 为基准,分别改变桩径及桩间距,计算得到不同地基差异沉降的变化规律,如图 9 所示。

从图 9(a) 可以看出:油罐中心范围内复合地基,当保持桩径 1.0 m 不变,桩间距逐渐增大时,复合地基差异沉降随桩间距增大而增大,其变化幅度随地基土刚度的减小而增加,即软弱地基差异沉降受置换率变化的影响较大。



(a) 桩间距变化



(b) 桩径变化

图 9 置换率变化时地基差异沉降的变化曲线

图 9(b) 中,油罐地基中心范围内复合地基,当保持桩间距 1.5 m 不变,桩径逐渐增大时,复合地基差异沉降随桩径的增加而减小。从图 10(b) 中同样看到软弱地基差异沉降受置换率变化的影响较大。

将桩间距 1.75 m 不变、桩径变化定为方法①;将桩径 1.0 m 不变、桩间距变化定为方法②。比较改变置换率的这 2 种方法所得的地基差异沉降,如表 4 所示。

表 4 桩径和桩间距变化时的地基差异沉降

方法	桩径/m	桩间距/m	不同地基土差异沉降/mm				置换率
			3.5 MPa	6.0 MPa	8.0 MPa	10 MPa	
基准方法	1	1.75	361	275	247	228	0.296
方法①	0.6	1.75	729	492	435	395	0.107
	1.2	1.75	307	200	183	169	0.426
方法②	1	3.00	678	451	396	378	0.102
	1	1.50	288	200	181	167	0.426

从表 4 可以看出,采用 2 种增加置换率的方法均能减少地基的差异沉降。但同时看到,采用方法②在较小置换率情况下得到了比方法①更小的地基差异沉降,说明油罐复合地基差异沉降并不是简单随着置换率的增加而线性变化的。从计算结果来看,油罐中心范围内复合地基,保持桩径不变,增加桩间距以增加置换率,对降低地基差异沉降效果更好。

其次考虑置换率不变。以桩径 1.0 m 和桩间距 1.75 m 时的复合地基的置换率 0.296 为不变基准(定为基准方法),分别对桩径为 0.6、1.0、1.2 m(桩间距随之改变)时不同地基刚度的差异沉降进行计算。

图 10 为置换率不变时,计算所得不同地基差异沉降在不同桩径条件下的变化曲线,从图 10 可以

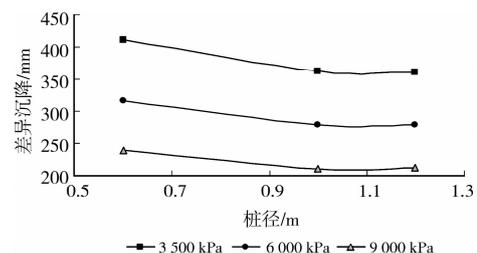


图 10 置换率不变时,地基差异沉降的变化曲线

看出,油罐中心范围内复合地基置换率不变,油罐地基差异沉降是随着桩径的增加而逐渐减小的;曲线在较大桩径时变化趋缓,说明差异沉降随桩径变大,

其变化幅度变小。

### 4.3 罐底环梁基础内褥垫的影响

无论是环墙式还是护坡式罐基础都要高出地面,需要回填土或砂石料。如果加强回填材料,可调整应力的传递,减少边中的沉降差。加强办法之一是将回填料改为碎石,一般厚度在 300 mm 左右,这就是通常说的“褥垫”,这种方法调整能力强,常应用在许多半填半挖罐基础上。通过褥垫调整应力分布,使不均匀的地基形成一个整体<sup>[16]</sup>。

为研究分析褥垫对减小差异沉降所起的作用,

在复合地基其他各种参数都相同的前提下,对比没有褥垫与不同褥垫长度时,不同模量地基的差异沉降,分析褥垫在地基加固中所起的作用。

图 11 为不同地基刚度时,计算所得不同地基差异沉降在不同褥垫长度条件下的变化曲线。从图 11 可以看出,在不同地基刚度模量时,无一例外,随着褥垫层半径的增加,碎石桩地基差异沉降明显减小,当褥垫半径为 20 m,即褥垫层的布置率为油罐底面积的 60%时,差异沉降达到最小值。

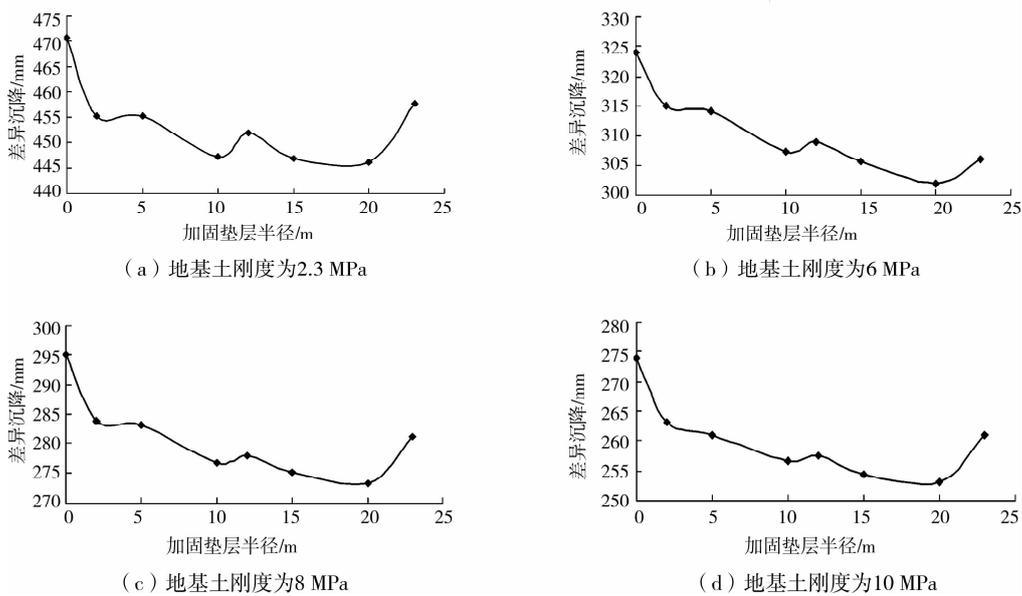


图 11 不同地基刚度、不同褥垫长度时地基差异沉降的变化曲线

### 4.4 不同差异沉降调整方法的对比

图 13 为不同调整方法的油罐最终差异沉降量对比图。其中,通过调整长桩分布的差异沉降为 37 mm,改变不同位置置换率的差异沉降为 68 mm,改变褥垫层的差异沉降为 446 mm,现场监测的差异沉降为 470 mm,表明通过改变桩长,改变不同位置置换率可以有效地减少油罐地基差异沉降,效果十分明显。

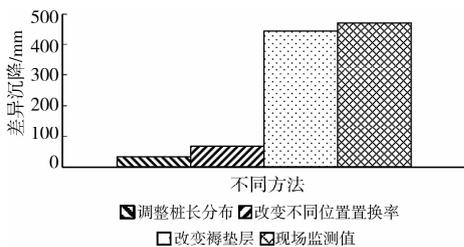


图 13 不同调整方法最终差异沉降量对比

如图 14 所示,不同差异沉降调整方法的油罐地基侧向位移曲线对比图,剖面位于距油罐中心 22 m

处。通过调整差异沉降,油罐地基出现了负的侧向位移,具体体现在 3 方面:1)剖面线上最大负侧向位移的绝对值大幅增加,由 0.00 m 增加为 0.08 m;2)出现负向最大侧向位移的深度范围增加,由 5 m 增至 15 m;3)出现负侧向位移的增大幅度由大到小依次为:改变桩长,改变不同位置置换率,改变褥垫层刚度,与差异沉降减小幅度的顺序相同,因此,油罐地基出现负向侧向位移是差异沉降调整的一个重要特征。

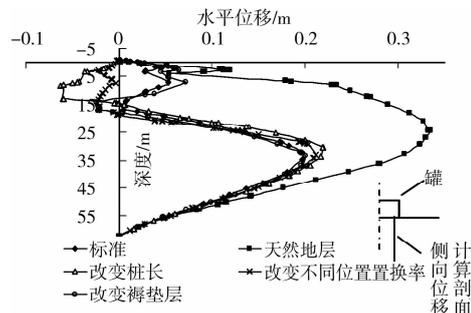


图 14 侧向位移曲线图

## 5 结论

1)油罐地基差异沉降随着不同桩长分布范围产生变化,其中,在长桩: $0\sim 0.33D$ ,中桩: $0.33\sim 0.39D$ 或 $0.33\sim 0.42D$ ( $D$ 为油罐直径)处形成一极小值;

2)油罐中心范围内复合地基,通过固定桩径不变,增加桩间距来增大置换率,可使复合地基在相对较小的置换率条件下获得更小的差异沉降。

3)油罐中心范围内复合地基,置换率一定时,桩径越大(同时桩间距也就越疏),碎石桩地基的差异沉降也就越小;随着桩径越来越大,差异沉降的增幅也越来越小。

4)褥垫层的布置率为油罐底面积的60%时,差异沉降达到最小值。

5)不同差异沉降调整方法对比发现,通过调整长桩分布、置换率可以很好的降低地基差异沉降,而改变褥垫层的效果不是十分明显。

6)调整差异沉降,使地基土出现负的侧向位移,其产生的范围和大小越大,差异沉降越小,因此,油罐地基负向侧向位移的出现是差异沉降调整的一个重要特征。

### 参考文献:

- [1] 刘金砺. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 100-105.  
LIU JIN-LI. Review and optimization of the conceptual design of foundations for high-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 100-105.
- [2] MARR W, ALLEN RAMOS JOSE A, LAMBE T. William. Criteria for settlement of tanks[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108 (GT8): 1017-1039.
- [3] SHEN SHUI-LONG, HONG ZHEN-SHUN, XU YE-SHUANG. Reducing differential settlements of approach embankments [C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, Thomas Telford Services Ltd, 2007.
- [4] NAMURA AKIRA, SUZUKI TAKAHIRO. Evaluation of countermeasures against differential settlement at track transitions [R]. Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute), Ken-yusha Inc, 2007.
- [5] ZHU B, GAO D, CHEN Y M. Geomembrane tensions and strains resulting from differential settlement around rigid circular structures [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 53-62.
- [6] GU QIANG-KANG, LI NING, HUANG WEN-GUANG. Research on differential settlement index of high-filled subgrade after construction in mountainous airport [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (12): 3865-3870.
- [7] AKBAS SAMI O, KULHAWY FRED H. Reliability-based design approach for differential settlement of footings on cohesionless soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1779-1788.
- [8] KIM Y S, SHEN C K, BANG S. Oil storage tank foundation on soft clay [C]// Proceedings of the 8th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1983: 371-374.
- [9] 陈龙珠, 梁发云, 丁屹. 变刚度复合地基处理的有限元分析[J]. 工业建筑, 2003, 33(11): 1-4.  
CHEN LONG-ZHU, LANG FA-YUN, DING QI. The variable stiffness of composite foundation with finite element analysis [J]. Industrial Construction, 2003, 33 (11): 1-4.
- [10] 黄斌, 杨敏, 熊巨华. 软粘土层上的油罐差异沉降 [J]. 建筑科学, 2004, 20(2): 31-35.  
HUANG BIN, YANG MIN, XIONG JU-HUA. Differential settlement of oil storage foundation on soft clay [J]. Architectural Science, 2004, 20(2): 31-35.
- [11] Horikoshi K, Randolph M F. Optimum design of piled rafts [J]. Geotechnique, 1998, 48(3): 301-317.
- [12] RANDOLPH M F. Science and empiricism in pile foundation design [J]. Geotechnique, 2003, 53(10): 847-875.
- [13] BRINKGREVE R B J, BROERE W, WATERMAN D. PLAXIS Version 8 Material Models Manual [M]. The Netherlands: Delft University of Technology & PLAXIS, 2002.
- [14] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1992.
- [15] 陈希哲. 土力学地基基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 71.
- [16] 魏路先. 复杂软弱地基条件下大型储油罐地基处理综合技术研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.

(编辑 胡英奎)