

超深水泥搅拌桩处理大型油罐软弱地基的试验研究

袁文明 戴济群 黄康理 苏冬林

(南京水利科学研究院土工研究所 ,江苏 南京 210024)

摘要 :介绍采用 27 m 长超深水泥搅拌桩处理 5 万 m³ 大型油罐深厚非匀质软弱地基取得的成功经验 ,详细论述搅拌桩设计和沉降计算、工程桩的效果检验以及油罐充水期的安全监测等内容。
关键词 水泥搅拌桩 油罐 软基 充水预压 安全监测
中图分类号 :TU471.8 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)01-0063-04

某炼油厂在原油罐区内扩建 8 座 5 万 m³ 浮顶式钢结构原油贮罐 ,罐高 19.35 m ,直径 60 m ,使用荷载为 244 kPa。建设场地临近江边 ,是典型的河漫滩地。天然地基除表层有 2 ~ 4 m 厚填土层外 ,向下是 12 ~ 21 m 的淤泥质粘土 ,承载力只有 70 kPa ,且软土层厚薄很不均匀 ,满足不了罐基对承载力及变形的要求。为此 ,设计用 16 ~ 27 m 深层搅拌桩加固并取得了成功。主要研究成果表现在 (a)深度上的突破。桩长超过 27 m ,使水泥搅拌桩加固软基的深度比通常情况增加了 10 m 左右。(b)桩体强度上的突破。通过工程桩检验 ,桩体强度超过 3 MPa ,近似于软质岩石 ,建罐后充水期沉降最大达 67 mm ,在国内外是少有的。(c)水泥搅拌桩质量检测的突破。用标贯与取芯强度试验相结合的方法来检验工程桩质量 ,打破了规程规范的条例 ,创出一条新的检验方法 ,具有一定的科学性。(d)格网式的布桩设计 ,以正方形布桩为主 ,并在罐基关键部位桩与桩间增加构造边桩 ,将桩和连续墙有机地结合在一起。这种布桩形式形成了多道多方向桩壁 ,对增强复合地基整体刚度、减少土的侧向挤出有很好的作用。

1 地质条件

建设场地地貌属长江中下游河漫滩单元 ,地层为全新统河流相冲积层 ,地基土在勘察深度 50 m 范围内分为 7 层 ,依次为 (a)填土层 ,厚 0.5 ~ 0.8 m (b)粘土层 ,厚 1.5 ~ 2.9 m (c)淤泥质粘土层 ,厚 12 ~ 21 m ; (d)淤泥质粘土夹薄粉砂层 ,厚 1.0 ~ 1.5 m (e)细砂层 ,厚约 15 ~ 19 m (f)粉质粘土与粉砂质层 ,厚 3.0 ~ 6.5 m (g)粉质粘土夹碎石层 ,厚 5.0 ~ 8.0 m。第 2 至第 5 层土的物理力学特性指标见表 1。可以看出 :第 3 层土具有强度低、压缩性高、埋藏深而且不均匀的特点 ,对罐基极为不利 ,是主要需加固的土层。

表 1 建设场地地基土的物理特性

Table 1 Physical properties of foundation soils at construction site

土层	ω /%	γ (kN·m ⁻³)	e	S_r /%	ω_i /%	ω_p /%	I_p /%	a /MPa ⁻¹	E_s /MPa	C_{cu} /kPa	φ_{cu}	R /kPa	q_u /kPa
第 2 层	35.5	18.5	1.00	98	39.8	22.1	17.5	0.49	4.7			100	
第 3 层	47.3	17.2	1.34	98	43.8	25.6	18.0	0.83	2.8	11.0	15.3	70	40.3
第 4 层	42.7	17.5	1.18	94	41.5	24.2	17.3	0.60	3.9	13.0	21.0	30	
第 5 层	18.3	9.1						0.14	14.7	7.0	22.8	150	

2 格网式的布桩设计及沉降计算

2.1 格网式的布桩设计

水泥搅拌桩桩径 700 mm ,以 1 200 mm × 1 200 mm 的方格网布置。为限制罐基内软土的侧向位移及减小垂直沉降量 ,罐周上做 3 道水泥搅拌桩互相搭接的封闭构造圈 ,径向上再做 6 ~ 8 个互相搭接的射形桩壁 ,最终在平面上形成格网状的群桩 ,平面布置见图 1。每根水泥搅拌桩桩端需进入细砂层 300 mm ,施工桩长为 16.3

~27.0 m,总桩数为3079根.

水泥搅拌桩主要参数如下:水泥为525#矿渣散装水泥;根据该场地土层特性及试桩效果,每根桩上部(0~5 m)、下部(桩长×(0.6~5 m))的掺入比为13%,中间段为18%;水灰比为0.5;减水剂为水泥重量的0.2%;生石膏掺入量为水泥重量的2%.

要求加固后复合地基承载力标准值 $R_{sp} \geq 240$ kPa,水泥搅拌桩桩身强度标准值 $q_{up} \geq 800$ kPa.

2.2 沉降计算

天然地基的沉降按三维分层总和法计算;搅拌桩加固后加固区内的加固体和周围土体视为一种复合体,故采用桩土复合模量来评价这种复合体的压缩性,并用分层总和法计算加固范围桩体的沉降 S_1 :

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{E_{spi}} H_i$$

(1)

$$E_{spi} = mE_p + (1 - m)E_{si}$$

(2)

式中: P_i ——第*i*层复合土层上的附加应力; H_i ——第*i*层复合土层的厚度; m ——置换率, $m = 0.267$; E_{spi} ——第*i*层复合土层的复合压缩模量; E_{si} ——第*i*层土的压缩模量.

桩端以下范围内下卧层压缩量 S_2 :

$$S_2 = m_s \frac{P_0}{E_s}$$

(3)

式中: P_0 ——下卧层顶面附加应力; E_s ——下卧层土体加权平均压缩模量; m_s ——沉降修正系数.

罐基东、西、南、北、中5个测点的天然地基沉降和搅拌桩加固后的地基沉降量计算值见表2.可以看出,搅拌桩加固后,5个测点的地基沉降减少90%左右,其差异沉降仅为4 mm,倾斜率可忽略不计.

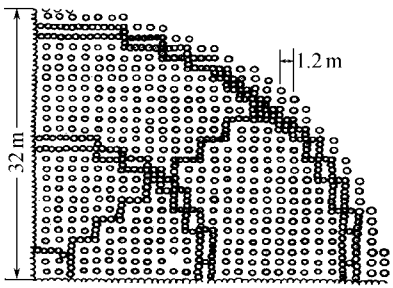


图1 深层搅拌桩平面布置示意图
Fig.1 Plan of deep cement soil mixing piles

表2 沉降量计算值

Table 2 Calculated of settlement

测点	天然地基沉降量/mm	搅拌桩加固后地基沉降量/mm			消除沉降率/%
		S_1	S_2	$S_1 + S_2$	
东	1040	54	19	73	93
西	1020	56	21	77	92
南	870	38	43	81	91
北	1080	56	61	117	89
中	2280	53	83	136	94

3 超长水泥搅拌桩的施工及桩身质量检测

3.1 桩的施工

施工所用机具为单轴搅拌机,功率为55 kW,搅拌叶片双层共6个,喷浆压力为500 kPa,提升速度1.0~1.2 m/min.施工时,要达到设计桩长并搅拌均匀,不能出现断浆和水泥富集现象,输浆管道不能堵塞.严格控制重复搅拌时的下沉和提升速度,允许误差0.05 m/min.为确保每个深度都能充分搅拌,喷浆后每点搅拌不能少于20次.桩的垂直偏差不能超过1%,桩位偏差不能大于50 mm.

3.2 桩身质量检验

桩身质量检验主要有3个内容^[2]:(a)随机选取1%左右的桩体进行10 d龄期的标贯试验,位置在桩顶下2.5、8、11、14、18、24 m处,检测标准:击数 $N_{63.5}$ 不得小于10击.(b)在标贯检测的桩身全程取芯做外观检查,检测标准:桩芯水泥土颜色一致,搅拌均匀,没有大量水泥块富集或未被搅匀的土块.(c)取芯做室内强度试验.在标贯试验点上部10 cm处取未被扰动的水泥土样密封于土样桶内,当日带回实验室做无侧限抗压强度试验.

现场标贯检验共抽检48根桩,其中10 d龄期的37根,30 d龄期的4根,150 d龄期的7根.图2为48根桩标贯击数 $N'_{63.5}$ 沿深度(H)的分布情况,其中击数沿深度已作过修正.从图中看出:10 m以上桩身标贯击数 $N'_{63.5}$ 在40击左右,往下逐步递减,到22 m深度时 $N'_{63.5}$ 平均在15击左右.

3.3 桩身强度与 $N'_{63.5}$ 的关系

图3是室内无侧限抗压强度与对应位置标贯击数的相互关系.随着 q_u 的增加, N' 也成正比增加.表层土(5 m以上) $N'_{63.5}$ 在60击以上, q_u 均在3.0 MPa以上.在淤泥质粘土层中,10 d、30 d、150 d龄期中桩体标贯检验

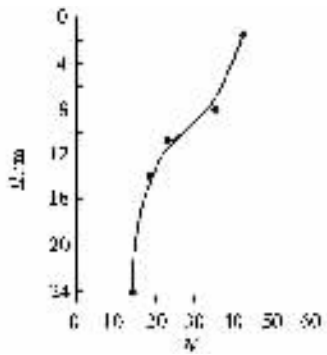


图 2 10 d 龄期的现场桩身水泥土 $N' \sim H$ 关系
Fig.2 $N' \sim H$ curve for cement soil mixing pile at the age of 10 days

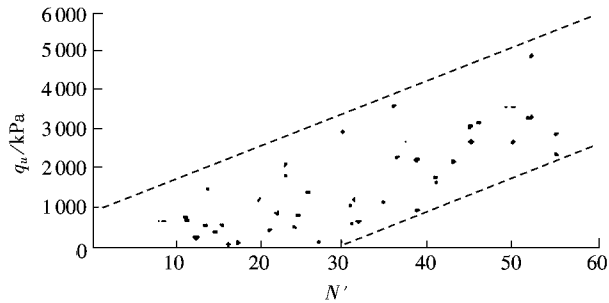


图 3 $q_u \sim N'$ 曲线
Fig.3 $q_u \sim N'$ curve

的平均击数 N' 分别为 22.3、32.9 和 47.7,对应的桩体平均强度分别为 480、1138 和 2522 kPa. q_{u10} 、 q_{u30} 、 q_{u150} 之间的相互关系为: $q_{u10} = N' / 46.5$ 、 $q_{u30} = N' / 28.9$ 、 $q_{u150} = N' / 18.9$ (q_u 的单位为 MPa).

4 充水期的安全监测

4.1 原观仪器布置

本罐(913#)土工原观观测仪器有^[1] 深层沉降观测管 4 孔,其中有 2 孔埋设在桩身内,深层土体水平位移测试管(测斜管)2 孔;孔隙水压力计 15 个;土压力应力测试计 6 只;桩身应力计 24 只;地表垂直沉降连续测试管 1 根.另外,还设置了 16 个罐壁沉降观测点.上述观测仪器埋设位置详见图 4.

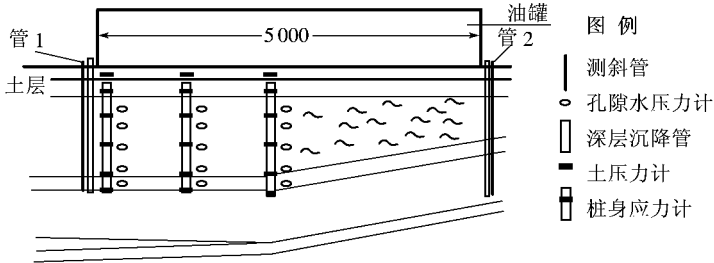


图 4 观测仪器埋设示意图
Fig.4 Sketch of buried instruments for observation

4.2 观测结果分析

4.2.1 环梁沉降

从建罐至充水到顶,经预压期稳定后,环梁沉降在 29~67 mm 范围,平均为 42.6 mm(其中南半罐沉降在 29~34 mm 范围,北半罐沉降在 42~67 mm 范围),反映了软土中桩长(南北相差 8.4 m)和桩底可压缩下卧层厚度(南北相差 4.1 m)引起地基轻微不均匀沉降.南北径向倾斜度为 0.06%,远远低于规范容许值 0.4%.

4.2.2 罐外桩间土的侧向位移和罐内桩间土压力

南北向罐壁外 60 cm 处地面沉降为 12~13 mm,桩间土侧向水平位移为 5~14 mm,如图 5.罐外土体变形如此之低足以说明环梁处 3 圈边桩及格网式布桩对减低罐内外土体变形的巨大作用.

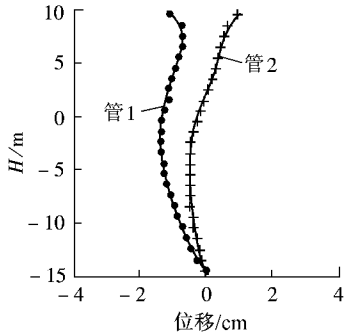


图 5 环梁外桩间土深层侧向位移
Fig.5 Lateral displacement of inter-pile soil outside the ring beam

桩间土土压力在整个充水过程中变化不大,基本维持在一个稳定的数值.充水 17.5 m 高时,北半罐 $0R$ 、 $\frac{1}{2}R$ 、 R (半径)处地表层桩间土压力分别为 42 kPa、46 kPa、21 kPa.这表明:由于桩体变形模量高出桩间土近百倍,充水荷载几乎都缓慢集中在桩体上.

4.2.3 桩间土孔隙水压力

由于充水荷载主要为桩体承担,桩间土受力较小,因此桩间土超静孔隙水压力的测试值均不大.

4.2.4 桩身应力和桩土应力比

图 6 为充水过程中桩身应力沿深度的分布曲线.充水至顶时,罐中和罐壁处桩顶应力分别为 602 kPa 和 324 kPa,桩底以上 0.3 m 处分别为 12 kPa 和 29 kPa,桩顶下 4.5~5 m 粘性填土层分担了桩顶荷载的 32%.从本罐桩身应力的分布可见,深层搅拌桩的有效作用深度可以达到 27 m.

从桩身应力换算出的桩侧摩阻力沿深度分布曲线如图7所示.淤泥质粘土层(深度10.3~17.5 m)中的桩侧摩阻力发挥值约为标准值的0.31~0.42倍.地表粘性填土层中桩侧摩阻力则为设计值的1/2左右.从实测结果来看,桩侧摩阻力发挥值还与桩的置换率以及桩所处的位置有关.

图8为罐中位置地基中桩土应力比与充水高度的对应变化曲线.可以看出,桩土应力比随充水高度增加而增大,由充水4.6 m时的3.6增大到充水17.5 m时的14.5;充水到17.5 m时,罐壁处地基中桩土应力比为15.3,与罐中接近.

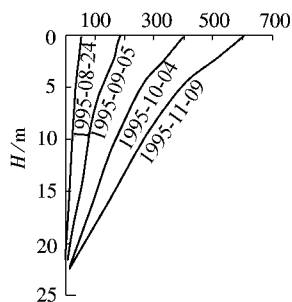


图6 桩身轴力分布历时曲线

Fig.6 Duration curve of axial force distribution along piles

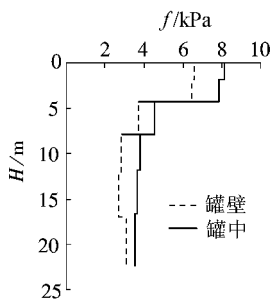


图7 桩侧摩阻力分布曲线

Fig.7 Distribution curve of lateral friction along piles

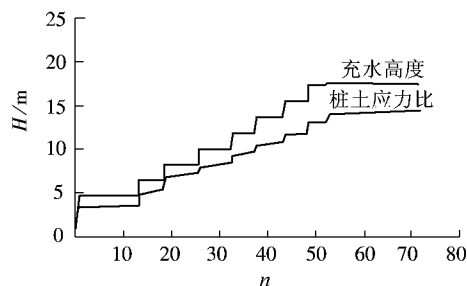


图8 桩土应力比和充水高度变化曲线

Fig.8 Variations of pile-soil stress ratio and water level during water filling

5 结 语

a. 用长27 m的深层搅拌桩来加固深厚的软弱地基,桩体强度超过3 MPa.建罐后经充水预压,环梁沉降为29~67 mm,罐中心沉降为140 mm,径向倾斜率为0.06%,消除了天然地基沉降95%以上,说明加固是成功的.

b. 格网式的布桩形式有效地减低了罐壁土的侧向挤出,罐壁外60 cm处桩间土上的侧向位移仅5~14 mm,地表沉降为12~13 mm.

c. 充水荷载主要由桩体承担,应力集中现象明显,且随每级充水荷载恒压时间的增长而加大,最大桩间土应力比达到15.

d. 只要控制好一定的配比,并保证桩身施工质量,超深搅拌桩的加固深度可达27 m以上.

e. 用标准贯入试验结合取芯,并进行室内强度试验来评定搅拌桩效果,适合搅拌桩桩体质量评定,具有一定的科学性,可以大力推广应用.

参考文献:

- [1] 袁文明,何开胜.超深水泥土桩地基的安全监测[J].大坝观测与土工测试,2000,24(5):54—57.
- [2] 何开胜,袁文明.超深水泥土桩质量检测和控制标准[J].工业建筑,1999,29(1):57—60.

Experimental study on treatment of large-scale soft oil tank foundation with ultra-deep cement mixing piles

YUAN Wen-ming, DAI Ji-qun, HUANG Kang-li, SU Dong-lin

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: An introduction is given to the successful experiences in the treatment of a large-scale non-homogeneous soft foundation of oil tanks with a capacity of $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ by use of 27 m ultra-deep cement mixing piles, including the design and settlement calculation for the mixing piles, examination of effectiveness of engineering piles, and safety monitoring during the water filling period of oil tanks.

Key words: cement mixing pile; oil tank; soft foundation; preloading by water filling; safety monitoring