

DOI: 10.11779/CJGE201806017

大型储罐 CFG 桩复合地基变形性状和变刚度调平设计

李继才^{1,2}, 郇能惠^{*1}, 丛建¹, 曹永琅¹, 曹军^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 大型储罐对地基的承载力要求高, 对不均匀沉降量有严格限定, 天然地基不能满足要求, 需要进行地基处理。通过现场试验和数值分析相结合的手段研究了大型储罐 CFG 桩复合地基的变形性状, 揭示了大型储罐 CFG 桩复合地基的沉降呈内大外小的碟形分布, 距储罐地基中心 $0.7R$ (半径) 范围内沉降值较大且变化幅度不大 (约为 20%), 定义为储罐地基沉降核心区, 影响沉降最主要的因素是 CFG 桩的桩长, 在此基础上提出大型储罐复合地基空间变刚度调平设计方法, 即增加沉降核心区的地基刚度或同时减小沉降非核心区的地基刚度, 以有效减小储罐地基的差异沉降, 改善储罐结构的受力状态。

关键词: 大型储罐; CFG 桩; 复合地基; 变形性状; 空间变刚度调平

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)06-1111-06

作者简介: 李继才(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事地基处理等方面的科研工作。E-mail: jcli520@126.com。

Deformation behaviors and variable rigidity design with equilibrium settlement for CFG pile composite foundation of large storage tanks

LI Ji-cai^{1,2}, LI Neng-hui¹, CONG Jian¹, CAO Yong-lang¹, CAO Jun^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing R & D Tech Group Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: The foundation of large storage tanks has requirements of large bearing capacity and limited differential settlement. Because the natural foundation generally cannot meet the requirements of bearing capacity and deformation, it needs to be treated. It is revealed that the settlement distribution of the foundation of storage tanks has the shape of the disc with large settlement inside and small one outside, and the settlement within the scope of $0.7R$ away from the center of foundation is large and has no great change (about 20%) through field tests and numerical simulations, which is defined as the core area for the foundation settlement of storage tanks. The most sensitive influencing factor to the settlement of CFG pile composite foundation of large storage tanks is the length of CFG piles. On this basis, the spatial variable rigidity design method with equilibrium settlement for the composite foundation of large storage tanks is proposed to raise the rigidity in the core settlement areas and to reduce that of the foundation in other areas. Thus the differential settlement of tank foundation is effectively reduced and the stress state of storage tank structure is improved.

Key words: large storage tank; CFG pile; composite foundation; deformation behavior; spatial variable rigidity of equilibrium settlement

0 引言

近几十年来,随着中国石油化工工业的快速发展,在沿海地区建造了一大批不同容量的储罐,而且趋向大型化^[1],在上海、黄岛、大连、仪征、营口等地建造了多座 $10 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型储罐。

大型储罐对地基的主要作用是罐体及储液自重,其特点是分布面积大,荷载大,影响深度大,对地基的承载力要求高,地基由此产生的沉降量也较大,过大的不均匀沉降会对罐体结构的受力状态和使用功能产生不良影响,甚至发生事故^[2-3]。沿海地区存在较深厚的软土,特别是近十几年来,吹填造陆已成为解决

沿海地区土地资源紧缺的主要方式,软土和吹填土地基厚度大、强度低、压缩性高,工程性质复杂,天然地基不能满足储罐对地基承载力和变形的要求,需要进行地基处理。CFG 桩复合地基具有地基承载力提高幅度大、地基变形小、适用范围广,以及施工快,质量容易控制等优点^[4],在房屋建筑、铁路、公路等工程中得到了较为广泛的应用。近年来,CFG 桩复合地基技术开始用于大型储罐的地基处理。刘影^[5]采用换填+CFG 桩+充水预压加固一座大型储罐素填土地基,

收稿日期: 2017-06-05

*通讯作者 (E-mail: nhli@nhri.cn)

表 1 各土层物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical properties of soil layers

层号	名称	状态	平均层厚 /m	干密度 ρ_d /(g·cm ³)	含水率 w/%	压缩模量 E_s /MPa	标贯击数 $N_{63.5}$	锥尖阻力 q_c /MPa	侧壁摩阻 力 f_s /kPa	承载力特征值 f_{ak} /kPa
②	中砂	稍密—中密	2.6	1.78		30.0	11.2	7.52	44	160
③	粉质黏土	软塑	1.7	1.74	23.0	4.01	3.2	0.67	23	85
③-1	含粉质黏土砂	松散—稍密	1.8	1.74	21.9	15.0	10.4	9.24	58	150
④	粉质黏土	软塑—可塑	6.9	1.58	23.6	4.55	5.5	1.31	34	120
⑤	中粗砂	中密—密实	2.6	1.84		30.0	29.6	8.04	104	280
⑥	粉质黏土	可塑	1.3	1.58	22.4	6.26	8.7	0.88	14	160
⑦	中粗砂	中密—密实	28.1	1.84		35.0	33.8			300

取得了很好的加固效果。丁小军等^[6]采用 CFG 桩加固一座大型储罐黄土地基，桩端持力层为卵石层，加固效果良好。但是目前大型储罐 CFG 桩复合地基的变形性状研究不够，得到的实测资料不多，理论研究落后于工程应用。

本文以某工程 02TK-307 罐为依托工程，通过现场试验和数值分析相结合的方法深入研究大型储罐 CFG 桩复合地基的变形性状、沉降分布规律和影响沉降的主要因素，提出了大型储罐 CFG 桩复合地基空间变刚度调平设计方法。

1 现场试验研究

02TK-307 罐是一座 10×10⁴ m³ 的浮顶罐，罐体直径 80 m，罐高 21.97 m。罐基础采用钢筋混凝土环墙基础，环墙高 2.5 m，厚 0.6 m。满储时储罐最大 124827.3 t。各土层的物理力学性质指标见表 1 所示。

储罐基底压力达 260 kPa，天然地基承载力仅 160 kPa 左右，不能满足承载力要求，采用 CFG 桩复合地基+充水预压加固地基。CFG 桩复合地基设计参数如下：桩径 400 mm、桩的排距和行距均为 2.1 m、桩长 13.45 m、单桩承载力特征值 450 kN、桩间土承载力特征值 160 kPa、复合地基承载力特征值 260 kPa。

为研究储罐 CFG 桩复合地基的变形性状，设置了环墙沉降测点，采用水管式沉降仪和分层沉降仪^[7]观测充水预压荷载作用下环墙沉降、储罐地基 CFG 桩和桩间土沉降以及环墙外侧深层土体的沉降随充水高度的变化规律。测点布置见图 1 所示。

GB50473—2008 规范要求储罐地基的变形允许值根据储罐的型式和容量确定^[8]。对平面倾斜，浮顶罐的沉降差允许值 $0.003D \leq \Delta_{\max} \leq 0.007D$ (D 为罐的直径)，固定顶罐 $0.008D \leq \Delta_{\max} \leq 0.015D$ ，罐的直径越大，沉降差允许值与罐直径的比值 ($\Delta_{\max}/D$) 越小；对非平面倾斜，浮顶罐的沉降差允许值 $\Delta S/l \leq$

0.0025，固定顶罐 $\Delta S/l \leq 0.0040$ ；罐基础锥面坡度 $i \geq 0.008$ 。

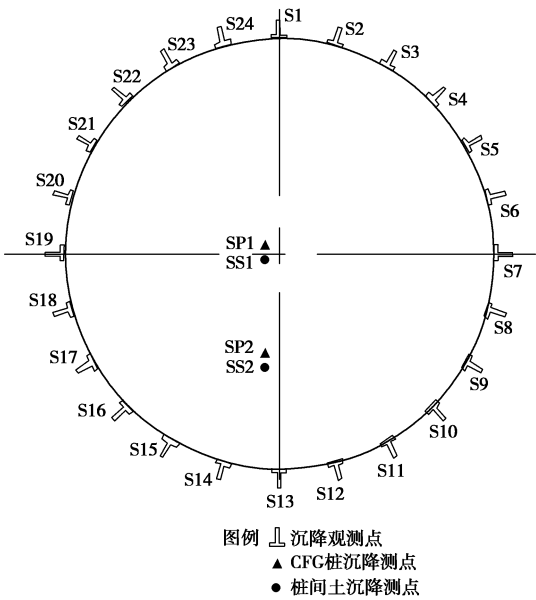


图 1 测点布置图

Fig. 1 Layout of observation points for settlement

1.1 环墙沉降

环墙顶面均匀设置 24 个沉降观测点（测点编号 S1~S24），测点间距约 10.5 m。在充水预压期间，环墙各测点沉降最大值见表 2 所示。从表 2 可以发现：

（1）充水预压期间测点 S4 的沉降最大，沉降值为 41 mm，测点 S11 的沉降最小，沉降值为 13 mm，平均沉降 30 mm。储罐环墙基础的刚度对其不均匀沉降的调节作用显著，环墙沉降均匀，罐周不均匀沉降较小。

（2）充水预压后相邻两个测点的最大沉降差 22 mm(S11 与 S12)，任意径向的最大沉降差 18 mm(S11 与 S23)，相应平面倾斜值 $\Delta_{\max}/D=0.0002$ 远小于规范的允许值 0.003，非平面倾斜值 $\Delta S_{\max}/l=0.0022$ 小于规范的允许值 0.0025。平面倾斜和非平面倾斜均满足储罐地基基础设计规范要求。

表 2 环墙各测点最大沉降值

Table 2 Settlements at various observation points in ring wall					
测点	沉降值/mm	测点	沉降值/mm	测点	沉降值/mm
S1	34	S9	30	S17	40
S2	37	S10	30	S18	19
S3	37	S11	13	S19	17
S4	41	S12	35	S20	25
S5	36	S13	20	S21	29
S6	27	S14	40	S22	32
S7	23	S15	37	S23	31
S8	25	S16	36	S24	35

1.2 储罐地基沉降变形性状

采用水管式沉降仪观测充水预压期间罐基中心和 0.5R (半径) 即 20 m 处 CFG 桩 (测点编号 SP1, SP2) 和桩间土沉降 (测点编号 SS1, SS2) 过程线见图 2 所示, 储罐地基 CFG 桩和桩间土沉降与充水高度的关系曲线见图 3 所示, 不同充水高度时储罐地基沉降分布见图 4 所示。可以看出:

(1) 储罐地基中心的沉降最大为 110 mm, 从中心到环墙逐渐减小, 0.5R 处地基沉降 90 mm, 环墙处最小为 30 mm (平均)。罐基中心与周边的沉降差最大值为 97 mm, 储罐地基沉降呈碟形分布 (见图 4)。

(2) 储罐地基沉降随充水荷载 (充水高度 h) 的增加而增大, 地基土逐渐固结, 卸载后有少量回弹 (见图 3), 沉降增大的幅度也随着荷载的增加而增大, 而且罐基中心与 0.5R 处的沉降比周边的沉降增大幅度大, 沉降的蝶形分布更加明显 (见图 4)。

(3) 充水至 19.2 m 时, 储罐地基中心处 CFG 桩与桩间土的最大沉降值分别为 69 mm 和 110 mm, 距中心 0.5R 处 CFG 桩和桩间土的最大沉降分别为 55 mm 和 90 mm。罐基中心及 0.5R 处桩顶向上“刺入”褥垫层, 最大上刺入量分别为 41 mm 和 35 mm。CFG 桩与桩间土变形不符合等应变假定。

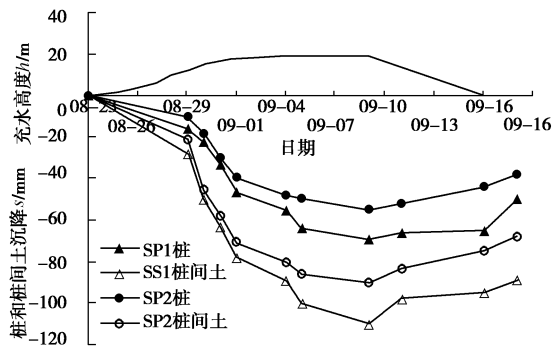


图 2 储罐地基 CFG 桩和桩间土沉降过程线

Fig. 2 Settlement curves of CFG plies and soil between piles of large tank

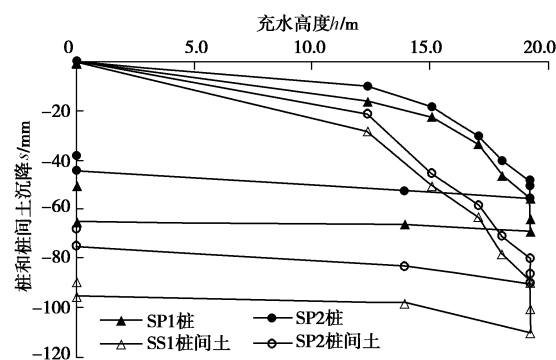


图 3 CFG 桩和桩间土沉降与充水高度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between settlement of CFG pile composite foundation and water height

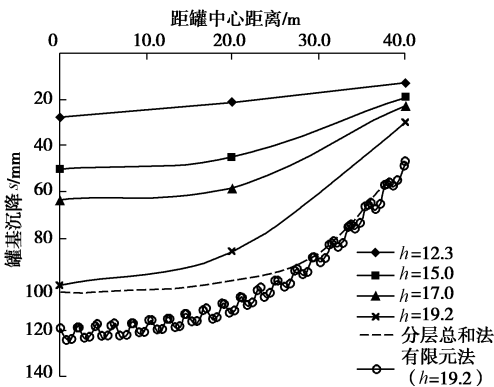


图 4 不同充水高度时罐基沉降分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of settlements of storage tank foundation at different water heights

2 数值分析

2.1 有限元计算

采用三维有限元法数值分析进一步研究大型储罐地基的沉降分布规律和地基沉降影响因素, 数值分析依托工程仍为 02TK-307 罐。地基分层与勘探孔一致, 厚度取其平均值, 储罐 CFG 桩复合地基剖面图见图 5 所示。考虑到储罐荷载对地基附加应力影响范围和深度, 有限元计算模型边界范围从储罐地基中心向外取 140 m, 在深度方向取 45 m。模型的边界约束条件为: 四周边界施加水平约束, 即 $u_x=u_y=0$; 底部边界施加三向约束, 即 $u_x=u_y=u_z=0$ 。由于储罐及 CFG 桩复合地基均为对称结构, 取 1/4 进行计算分析。

在进行储罐 CFG 桩复合地基有限元分析时, 地基土采用空间八节点六面体等参单元, 本构模型采用南水双屈服面模型^[9], 计算参数根据现场钻孔取样室内试验结果得到, 见表 3 所示; CFG 桩采用空间八节点六面体等参单元, 本构模型采用线弹性模型, 计算参数为: $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, $E=2.2 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\nu = 0.20$ 。储罐 CFG 桩复合地基数值分析有限元三维网格图见图 6

表 3 计算参数

Table 3 Computational parameters

层号	名称	平均厚度 /m	渗透系数 $/(10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	φ_0 $/(^{\circ})$	$\Delta\varphi$ $/(^{\circ})$	K	n	R_f	R_d	C_d	n_d
②	中砂	2.6	200	39.4	7.1	255	0.43	0.82	0.72	0.0027	0.65
③	粉质黏土	1.7	0.6	32.0	2.2	178	0.50	0.80	0.25	0.0029	0.88
③-1	含粉质黏土砂	1.8	46	34.0	2.0	185	0.46	0.80	0.72	0.0028	0.68
④	粉质黏土	6.9	0.2	24.0	5.4	143	0.51	0.73	0.20	0.0030	0.72
⑤	中粗砂	2.6	860	38.4	2.5	354	0.40	0.69	0.88	0.0026	0.58
⑥	粉质黏土	1.3	0.2	24.0	5.4	143	0.51	0.73	0.20	0.0030	0.72
⑦	中粗砂	28.1	860	38.4	2.5	354	0.69	0.69	0.88	0.0026	0.58

所示。有限元计算较真实地模拟 CFG 桩复合地基，共划分 341370 个单元，358690 个节点，计算采用 ABAQUS 有限元通用软件。

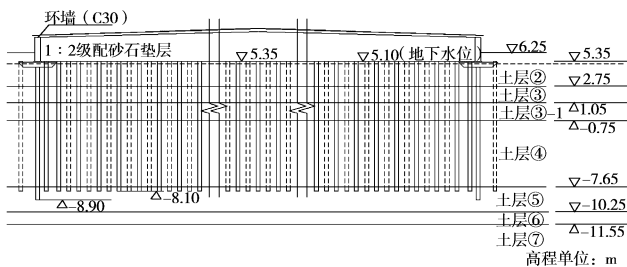


图 5 02TK-307 罐 CFG 桩复合地基剖面图

Fig. 5 Section of CFG composite foundation of 02TK-307 tank

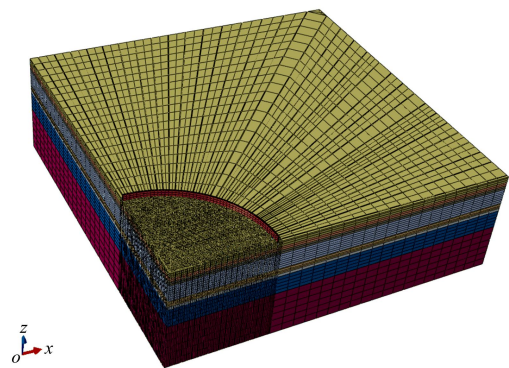


图 6 CFG 桩复合地基数值分析有限元网格图

Fig. 6 Finite element grid of CFG composite foundation

2.2 储罐 CFG 桩复合地基沉降分布规律

充水高度 19.2 m 恒压时相当于运行期满储时储罐 CFG 桩复合地基的沉降云图见图 7 所示，储罐地基表面的沉降随充水高度变化关系曲线见图 8 所示。罐基中心和 0.5R 处的罐基沉降实测值与有限元计算值的对比见表 4 所示，环墙外侧深层土体分层沉降仪实测值与有限元计算值对比见表 5 所示。可以看出：

(1) 储罐地基沉降分布是内大外小，罐基中心处最大为 123 mm，环墙处最小为 45 mm，呈碟形分布。环墙外 15 m 处地面沉降为 0，距环墙 15 m 以外，地

面发生了较小的隆起，最大隆起量约 10 mm。

(2) 距储罐中心 0.7R 即 28 m 处的沉降为 96 mm，约为罐中心沉降的 0.80。在储罐地基中心 0.7R 范围内沉降值均较大且变化幅度不大（约为 20%），将其定义为沉降核心区。0.7R~环墙的环形区域内地基沉降迅速减小，将其定义为沉降非核心区。

(3) 随着荷载增加，储罐地基沉降增加幅度增大，沉降的蝶形分布更加明显（见图 4，8）。

(4) 由于 CFG 桩的存在，加固区沉降等值线相对稀疏，荷载向深层传递，改变了地基的变形，加固区下卧层沉降等值线密集，沉降向深层土体发展，导致罐基深层土体产生较大的压缩变形（见图 7，表 5）。

(5) 计算值与实测值相差不大，趋势一致，说明有限元分析计算结果合理，符合实际。

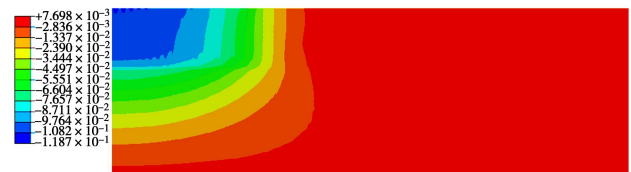


图 7 满储时 CFG 桩复合地基沉降云图

Fig. 7 Settlement nephogram of CFG composite foundation with full storage

表 4 储罐地基沉降计算值与实测值的对比

Table 4 Comparison between calculated and measured values of foundation settlement

项目	沉降/mm		
	罐基中心	0.5R	环墙
计算值	123	111	45
实测值	110	90	30 (均值)

表 5 环墙外侧深层土体分层沉降

Table 5 Settlement curves of deep soil at ring wall edge (mm)

项目	测点深度/m			
	1.9	6.5	11.6	16.6
计算值	40	31	17	7
实测值	30	24	14	5

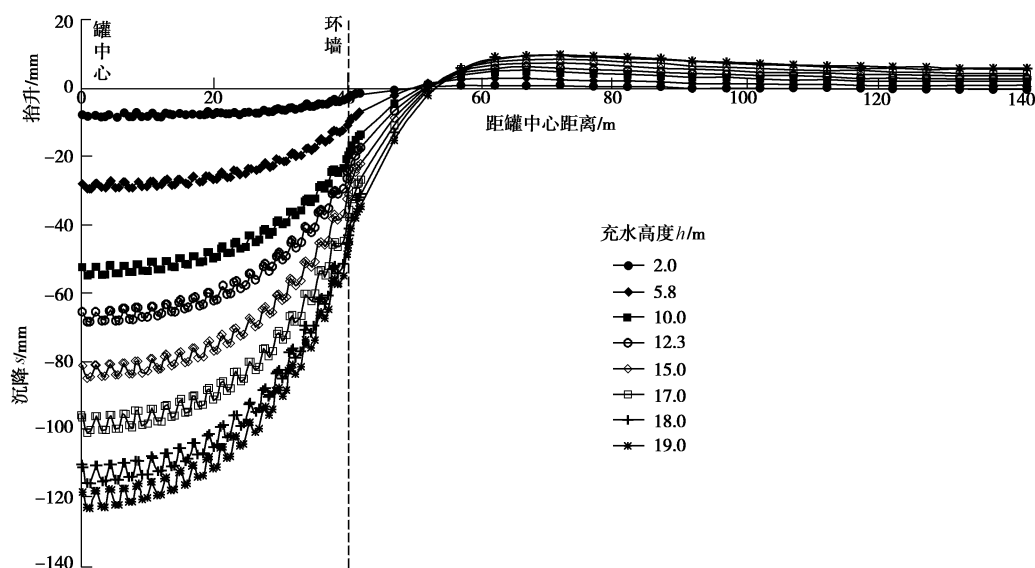


图8 不同充水高度时罐基垂直变形分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of vertical deformations of storage tank foundation at different water heights

2.3 储罐 CFG 桩复合地基沉降影响因素分析

影响因素分析的依托工程依然是 02TK-307 罐, 计算模型、计算参数与原设计方案相同, 即经过实测资料验证的同一基础上进行敏感性分析。储罐 CFG 桩复合地基的沉降影响因素较多, 采用数值分析方法研究 CFG 桩桩径和桩长对储罐复合地基沉降的影响。变桩径、变桩长及原设计方案在充水高度 19.2 m 即运行期满储时地基沉降计算结果见图 9 所示。

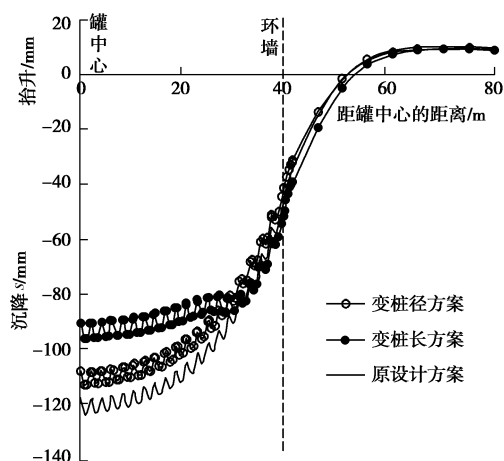


图9 不同储罐复合地基方案的地基沉降分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of settlements for different design plans of storage tank foundation

(1) CFG 桩桩径对沉降的影响

沉降核心区的桩径由 400 mm 增加至 500 mm 后, 储罐 CFG 桩复合地基沉降仍呈内大外小的碟形分布, 储罐地基中心沉降最大值由 123 mm 减小为 108 mm, 只减小了 15 mm。距罐中心 0.7R 的最大沉降值从 96 mm 减小为 88 mm, 只减小 8 mm。储罐地基 0.7R 范围内即沉降核心区 CFG 桩的面积置换率增加了 56%,

但复合地基的沉降只减小 10% 左右, 增加复合地基的置换率对减小罐基沉降值贡献不大。

(2) CFG 桩桩长对沉降的影响

沉降核心区的 CFG 桩桩长增加 6.0 m 后 (桩长为 19.45 m), 储罐 CFG 桩复合地基的沉降碟形现象明显减弱, 储罐地基中心的沉降最大值由 123 mm 减小为 91 mm, 减小了 32 mm。距罐中心 0.7R 的最大沉降值为 86 mm, 与罐中心的差异沉降为 5 mm, 与原方案比较, 差异沉降明显减小, 复合地基的变形趋向均匀, 说明增加沉降核心区的 CFG 桩桩长对于减小复合地基的沉降和差异沉降贡献明显。

2.4 空间变刚度调平设计理念

针对 CFG 桩均匀布桩的大型储罐 CFG 桩复合地基的沉降呈内大外小的碟形分布的特点, 在现场试验研究和数值分析成果的基础上提出了大型储罐 CFG 桩复合地基变刚度调平设计理念, 即增加罐基沉降核心区 (0.7R 范围内) CFG 桩的桩长, 提高其刚度, 达到改善大型储罐地基变形性状的目的, 不仅使大型储罐地基的总沉降量减小, 而且使沉降分布趋于均匀, 储罐地基的差异沉降显著减小, 从而减小不均匀沉降对罐壁和底板带来的不利影响。

2.5 空间变刚度调平设计方法

(1) 计算复合地基的沉降, 绘制沉降等值线图, 根据储罐 CFG 桩复合地基的沉降分布特点, 将储罐地基分为沉降核心区 (一般为 0.7R 范围内) 和沉降非核心区两部分。

(2) 根据储罐高度、直径、荷载和罐基地层分布及其物理力学性质, 调整 CFG 桩的桩长来改变沉降核心区和沉降非核心区的刚度, 可以是增加沉降核心区

的刚度,也可以是增加沉降核心区刚度的同时减小沉降非核心区的刚度。提出地基空间变刚度调平方案,达到减小储罐地基总沉降量和不均匀沉降量的目的。

(3) 验算复合地基的整体承载力。

以 02TK-307 罐简要说明储罐 CFG 桩复合地基的空间变刚度调平设计方法。原设计方案储罐地基中心与环墙的差异沉降为 78 mm,为减小它们之间的差异沉降,采取空间变刚度调平方案,将核心区的桩长增加 6 m。经空间变刚度调平后,储罐地基中心的沉降为 91 mm,距储罐地基中心 $0.7R$ 的沉降为 86 mm,环墙的沉降为 49 mm,储罐地基中心与环墙的差异沉降为 42 mm,减小了 36 mm (46%)。沉降核心区只有 516 根 CFG 桩,在工程投资相差不多的情况下,较大程度地减小了大型储罐地基的总沉降量和差异沉降,改善了大型储罐地基的沉降变形性状,有利于改善罐体结构受力状态,确保储罐安全运行。

3 结 论

采用现场试验和数值分析相结合的方法研究了储罐 CFG 桩复合地基在荷载作用下的沉降分布规律以及影响复合地基沉降的主要因素,提出了储罐 CFG 桩复合地基空间变刚度调平设计方法,得出以下主要结论:

(1) 储罐地基的沉降呈内大外小的碟形分布,一般来说距储罐地基中心 $0.7R$ (半径) 范围内沉降值较大且变化幅度不大 (约为 20%), 提出了储罐地基沉降核心区的概念。

(2) 影响储罐 CFG 桩复合地基沉降最主要的因素是 CFG 桩的桩长,增加 CFG 桩的置换率对减小复合地基的沉降贡献不大。

(3) 提出了储罐 CFG 桩复合地基空间变刚度调平设计方法,即增加沉降核心区的地基刚度或同时减小沉降非核心区的地基刚度,在工程投资相差不多的情况下,可有效减小储罐地基的沉降,特别是减小不均匀沉降,有利于改善储罐结构的受力状态。

参考文献:

- [1] 陈德志, 米广生, 张继军, 等. 中国大型储罐建设现状及发展趋势[J]. 石油化工建设, 2009(1): 28 - 32. (CHEN De-zhi, MI Guang-sheng, ZHANG Ji-jun, et al. Present situation and development tendency of large storage tanks in China[J]. Petroleum and Chemical Construction, 2009(1): 28 - 32. (in Chinese))
- [2] 徐至钧. 大型储罐基础地基处理与工程实例[M]. 北京: 中国标准出版社, 2009. (XU Zhi-jun. The foundation treatment and engineering examples in large storage tank foundation[M]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese))
- [3] 贾庆山. 储罐基础工程手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007. (JIA Qin-shan. Tank foundation engineering handbook[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007. (in Chinese))
- [4] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. CFG pile composite foundation technology and engineering practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 刘 影. 仪征地区 10 万 m^3 储油罐地基处理方案优选及应用[J]. 石油工程建设, 2015(2): 52 - 56. (LIU Ying. Selection and application of foundation treatment of $10 \times 10^4 m^3$ oil storage tank[J]. Petroleum and Chemical Construction, 2015(2): 52 - 56. (in Chinese))
- [6] 丁小军, 王 旭, 张延杰, 等. 大型油罐 CFG 桩复合地基变形与承载性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1851 - 1857. (DING Xiao-jun, WANG Xu, ZHANG Yan-jie, et al. Experimental study of bearing and deformation features of CFG-pile composite ground for large oil storage tanks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1851 - 1857. (in Chinese))
- [7] 南京水利科学研究院勘测设计院, 常州金土木工程仪器有限公司. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (Survey and Design Institute of Nanjing Hydraulic Research Institute, Changzhou Civil Engineering Instrument Ltd. Geotechnical project safety monitoring manual[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [8] GB 50473—2008 钢制储罐地基基础设计规范[S]. 2009. (GB 50473—2008 Code for design of steel tank foundation[S]. 2009. (in Chinese))
- [9] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型[C]// 中国土木工程学会第五届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京, 1990. (SHEN Zhu-jiang. A new model for stress and strain analysis of soil[C]// Proceedings of Fifth Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering of China Civil Engineering Society. Beijing, 1990. (in Chinese))