

大型油罐软弱地基 CFG 桩加固机制

俞然刚¹, 王 帅^{1,2}, 周金顺^{1,3}, 王佳玲¹, 王小雪¹, 张旭东¹

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 烟建集团有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 浙江省能源集团浙江金衢丽天然气有限公司, 浙江 杭州 310016)

摘要:为研究 CFG 桩对大型油罐软弱地基的加固机制,利用 FLAC^{3D}模拟分析 CFG 桩复合地基倾斜、沉降和加固特性,并采用单一变量法分析不同参数对 CFG 桩复合地基沉降的影响。结果表明:CFG 桩复合地基能够有效限制罐体的平面倾斜、非平面倾斜、平面沉降和非平面沉降,并有效地限制上部荷载的作用范围和地基隆起的产生;水平位移的最大值出现在地基地面处;CFG 桩复合地基中,桩长和桩间距是控制竖向沉降和加固效果的主要因素。

关键词:大型油罐; CFG 桩; 加固; 软弱地基

中图分类号:TE 85; TU 472 **文献标志码:**A

Reinforcement mechanism of CFG pile used in large oil tank soft foundation

YU Ran-gang¹, WANG Shuai^{1,2}, ZHOU Jin-shun^{1,3},
WANG Jia-ling¹, WANG Xiao-xue¹, ZHANG Xu-dong¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Yanjian Group Company Limited, Yantai 264000, China;
3. Zhejiang Jinquili Natural Gas Company Limited, Zhejiang Provincial Energy Group Company Limited, Hangzhou 310016, China)

Abstract: To study the soft foundation reinforcing of the large oil tank, the inclination, settlement and reinforcement characteristics of CFG pile composite foundation were studied by FLAC^{3D}. The effects of different parameters on the settlement of CFG pile composite foundation were studied using single variable method. The results show that CFG pile composite foundation can effectively restrict the plane tilt, non-plane tilt, plane settlement and non-plane settlement of tanks, and it can effectively reduce sphere of action of upper loads and restrict ground swell. The maximum horizontal displacement is at the bottom surface of the foundation. Pile length and spacing are the main factors controlling the vertical settlement and reinforcement effect.

Key words: large oil tank; CFG pile; reinforcement; soft foundation

滨海地区地质条件复杂,土体含水率高且压缩性大,在滨海地区软弱地基上建造大型储罐,困难较大。为防止不均匀沉降、罐体倾斜和罐底严重变形等事故,必须进行软弱地基的处理^[1-4]。CFG 桩全称为水泥粉煤灰碎石桩(cement fly-ash gravel piles),由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加适量的水搅拌形成高黏结强度的桩体,其与原始土层构成了复合地基。这种加固软弱地基的方法被证明是加固

效果和经济性兼顾的方法^[5-6]。前人对 CFG 桩复合地基褥垫层和群桩相互作用进行了研究^[5-8]。笔者模拟分析 CFG 桩复合地基倾斜、沉降和加固特性,考察桩长、桩径和桩间距 3 个主要参数对加固效果的影响。

1 基础资料

本工程位于青岛滨海地区,场地遍布盐池和沟

塘,交通不便,局部地段有积水,地表土质软弱。工程场地土性参数如表1所示。

分析现场测试以及土工试验数据可知,该油库软弱地基的平均承载力约为84 kPa,而 10^5 m^3 原油储罐的最大荷载可达210 kPa。因此,选用刚柔兼备的CFG桩复合地基加固该油库的油罐地基^[9-10]。

表1 工程场地土性参数

Table 1 Soil parameters of construction site

层号	岩土	厚度 <i>H/m</i>	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量 E_s/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	内聚力 <i>C/kPa</i>
1	淤泥质粉质黏土	1.5	1830	3.0	7.5	13
2	淤泥质粉土	10.0	1920	2.5	14.1	14
3	粉质黏土	2.5	1990	7.3	13.5	40
4	粉质黏土夹细粉砂	3.0	1940	12.0	13.7	46
5	粉质黏土夹粗砂	3.5	1910	12.0	13.3	36

2 模型的建立

由规范^[11,13]知:CFG桩可只在基础范围内布置,桩径取350~600 mm,桩间距宜取3~5倍桩径。CFG桩复合地基桩径现场由施工设备型号决定,本模型的桩径暂定0.5 m;桩间距的选择应综合考虑地基的承载力、土性、施工工艺的各个因素,规范要求宜取3~5倍桩径,即1.5~2.5 m,因此初步确定本模型中桩间距为2.0 m。

CFG桩复合地基,一般是将CFG桩的桩端落在强度高、压缩小的土层中^[5-6]。本工程所处场地的第一和第二层土分别为淤泥质粉质黏土和淤泥质粉土,属于软弱层,故应贯穿这两层,使CFG桩桩端坐落在粉质黏土夹细粉砂层,以保证桩端土有足够的承载力来有效地控制沉降。因此,根据该工程地质资料,初步确定本模型的桩长为17 m。

褥垫层的模量对桩与桩间土的应力分配起到决定性作用。随褥垫层模量的增加,桩土应力比增大,桩间土所受应力减小,桩体刺入垫层的深度也随之减小。综合已有的研究成果^[6-8]和地基处理规范的规定,暂定本工程油罐下褥垫层的厚度为0.3 m,压缩模量为80 MPa。由于褥垫层多选用中粗砂,因此将褥垫层模型设置为各向同性的弹性体。

建立长100 m、宽100 m、厚20.5 m的CFG桩基本模型。由于大型油罐的安全等级较高,且油罐对于水平向变形的要求较高,因此将CFG桩体的布置范围外延了6~46 m,以控制罐体的水平向位移。平面布置见图1。

完成模型参数的选择后,对模型进行简化。在材料的选择中,CFG桩桩体以及褥垫层的本构模型为各

依据相应的规范^[11-13]以及现有的施工条件,该工程加固方案的相应设计参数如下:垫层厚度为0.3 m,密度为 24 kN/m^3 ,压缩模量为12 GPa,泊松比为0.3,桩径为0.5 m,黏聚力为260 kPa,内摩擦角为 25° 。

项同性的弹性体单元;对于储罐下的土体,本构模型为Mohr-Coulomb模型。网格划分时,考虑到大型油罐下地基的沉降和倾斜特性,综合考虑计算的规模以及计算的准确性,在罐区模型沿径向均匀划分网格;而对于罐周土体,网格密度沿罐体的径向由内到外逐渐减小。所形成的FLAC^{3D}模型如图2所示。

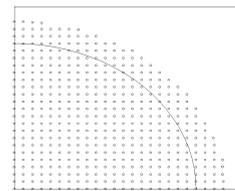


图1 CFG桩平面布桩示意图

Fig.1 Layout of CFG piles

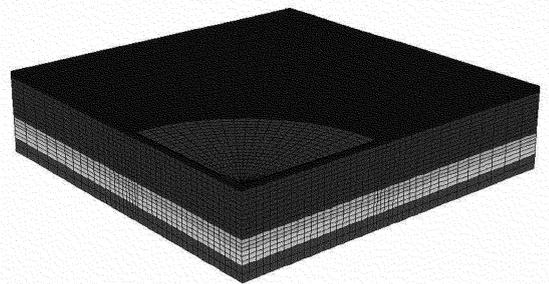


图2 CFG桩复合地基数值模型

Fig.2 Finite element model of CFG pile composite foundation

加载过程中荷载采用分级加载的方式进行,荷载共分5级,其中第一级载荷为总荷载的1/3;其余荷载分4级加载,各荷载分别为总荷载的1/6。

对于 10^5 m^3 的储罐,所应设置的观测点的数量为32个,且应沿罐体均匀布置,则模型中监测点的数量为9个。罐周竖向沉降观测点的布置如图3所示。储罐竖向位移观测点A、B、C、D、E、F、G、H、I的

沉降值分别为-40.1、-46.3、-51.2、-52.8、-47.9、-52.3、-51.1、-46.8、-40.1 mm。

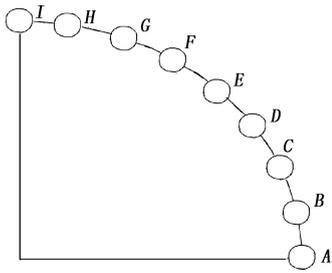


图 3 储罐竖向位移观测点位置图

Fig. 3 Layout of observation points of vertical settlement

3 结果分析

3.1 沉降和倾斜

大型油罐遭破坏的主要因素是罐基整体倾斜(平面倾斜)和罐周地基的不均匀沉降(非平面倾斜)。

CFG 复合地基沉降后的形状呈盘型,罐基正中间以及罐基边缘沉降较小。罐基沉降量最大值出现在距离罐基中心位置稍远的区域,为 225 mm;罐基中间位置沉降量约为 150 mm;罐边缘处沉降值为 75 mm。规范^[11]规定,对于 10^5 m^3 的储罐,平面倾斜的最大累计沉降差的限值为 $0.005D$ (D 为油罐直径)。某一直径方向的极限沉降值为 $2 \times (150 \sim 75) \text{ mm} < 0.005D = 400 \text{ mm}$,因此油罐的平面倾斜符合规范的要求。与内环梁基础和外环梁基础相比,内环梁基础中,罐体的平面倾斜的最大累计沉降差为 $150 \text{ mm}^{[10]}$;外环梁基础中,罐体平面倾斜的最大沉降差为 $180 \text{ mm}^{[10]}$ 。对比可知,CFG 桩复合地基能够有效地限制罐体的平面倾斜。

规范^[11]规定,油罐的非平面倾斜必须控制在某一范围之内。其中,对于浮顶罐和内浮顶罐而言,规定有: $\Delta S/l < 0.0025$ 。其中, ΔS 为罐周边相邻观测点的沉降差, l 为罐周边相邻观测点的周长。

CFG 桩复合地基中,当桩长为 17 m 时,相邻观测点的最大沉降差 ΔS 为 6.7 mm,罐周边相邻观测点的周长 $l = 7.85 \text{ m}$, $\Delta S/l = 0.00085 < 0.0025$,即 CFG 桩复合地基中非平面沉降值可以较好地满足规范要求,油罐的非平面变形较小,油罐不易发生非平面倾斜而导致罐壁受力过大破坏。与此相对应,在天然地基中,非平面沉降值为 21.4 mm;在内环墙、外环墙基础中,非平面沉降值分别为 18.7 和 $19.4 \text{ mm}^{[10]}$ 。由此可知,CFG 桩复合地基的加固效果

在防止平面及非平面沉降方面较其他基础形式及加固方式具有较大的优势。

3.2 加固特性

CFG 桩复合地基中的桩体是通过成桩机械在地基中搅拌地层土,以及外加的碎石、石屑、粉煤灰和适量的水泥制成的。由于其材料和制作的特殊性使得 CFG 桩具有某些刚性桩的特点。其中最主要的特点为桩身强度高,排水和挤土的效果明显。

在竖向荷载的作用下,由于 CFG 桩体的刚度较大,桩身的横向变形很小,可以较好地限制土体的侧向位移的产生。这一点明显区别于碎石桩等散体材料桩,它们在竖向荷载作用下会出现鼓胀破坏。

图 4 为 CFG 桩复合地基的剖面竖向沉降曲线。

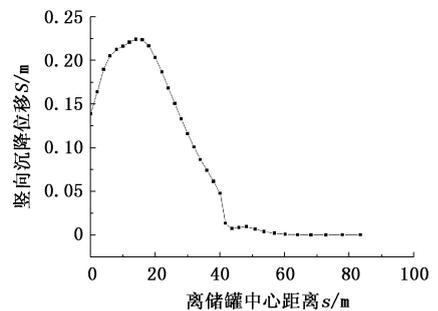


图 4 CFG 桩复合地基的剖面竖向沉降曲线

Fig. 4 Vertical settlement curve of cross-section of CFG pile composite foundation

由图 4 可知:CFG 桩能够较好地限制上部荷载的作用范围。由图 4 可知,上部荷载的影响范围只存在于 $0 \sim 40 \text{ m}$ 内,距储罐中心的距离 $R \geq 40 \text{ m}$ 时,荷载的影响几乎为 0。竖向沉降的最大值出现在距罐体中心 14 m 处,即距罐中心处 $0.35R$ (R 为油罐半径),这与天然地基以及环墙基础的最大沉降值出现在距罐体中心 $0.75R$ 处的现象^[10]有区别。究其原因,环墙基础及天然地基的地基强度较低,而 CFG 桩复合地基中,桩体的强度高,使得土中应力大部分由桩体承担,土中应力难以传递到离罐中心较远的距离。

CFG 桩复合地基能够较好地限制隆起的产生。由图 4 可知,在 $R = 48 \text{ m}$ 时,土体出现轻微的隆起现象,隆起值约为 1 mm,远远小于天然地基中以及环墙基础上的 $10 \text{ mm}^{[10]}$ 的隆起值。

图 5 为 CFG 桩复合地基模型的剖面变形矢量图。水平向位移最大值出现在底层土。在 CFG 复合地基中,水平向位移的最大值出现在地基底面处。究其原因主要是:对于 CFG 复合地基而言,由于 CFG 桩体的刚性较大,在桩长的分布范围内,桩体

承担了绝大部分的水平应力,而在没有桩体加固的底层土体,由于水平向的模量较小,因此在底层土产生了水平向位移的最大值。

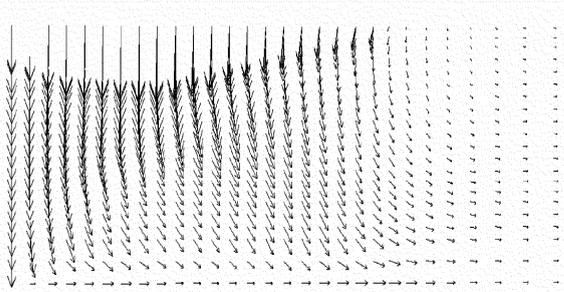


图5 CFG桩复合地基模型的剖面变形矢量图
Fig.5 Vector of section of CFG pile composite foundation deformation

另外,当离罐基中心距离 $16\text{ m} \leq R \leq 24\text{ m}$ 时,在深度为 $H=12\text{ m}$ 的土层中,土层的沉降量较周围

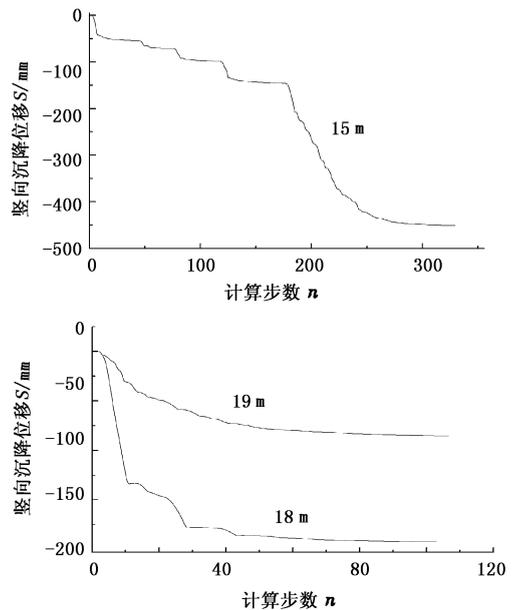
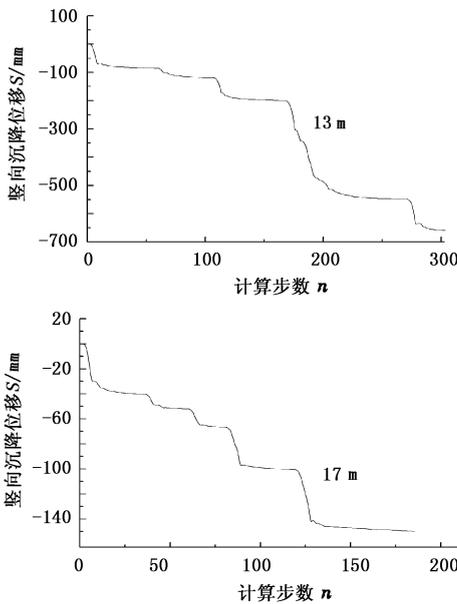


图6 桩长对沉降的影响

Fig.6 Effects of pile length on vertical settlement

当桩长为 13m;荷载施加第一级时,沉降值约为 70 mm;当施加到第二级时,沉降值增加至 84 mm,增加幅度约为 1.2 倍,与荷载的增加值不成正比;当施加第三级后,沉降值为 118 mm;而当施加至第四级荷载时,沉降值出现剧增现象,从 118 mm 骤增至 540 mm,这说明在本次荷载的施加过程中,复合地基达到其承载能力极限,发生了较大的塑性变形,使得沉降骤增,此时的荷载值约为 181.7 kPa;当荷载施加第五级时,土体完成固结,沉降达到 650 mm。

当桩长为 15 m;施加第一级荷载时,沉降值约为 50 mm,较桩长为 13 m 时的该级沉降明显变小;

土层的沉降量降低很多。这种现象的出现,一部分是由于 CFG 桩的桩身强度较大且桩的挤土效果明显,而另一方面则是由于上部土层的压缩较大,使得下部土层的密实度增大。从而使得此部分土体的强度相对于周围土层提高,提高值约为 50%。在天然地基和环梁基础中没有此种作用的产生。

3.3 沉降主要影响因素

在 CFG 复合地基中,一般认为对软土地基加固效果起决定性作用的两个因素为桩长和桩土面积置换率^[6],通过控制这两个因素可以达到优化地基加固方法的目的。因此对桩长、桩径和桩间距进行单一变量法系统分析。

3.3.1 桩长

图 6 为不同桩长时罐基正中心处沉降的监测值。其中,13、15、17 m 中的荷载通过分级加载施加,而对于桩长为 18 和 19 m 的情况,荷载一次性施加。

当施加第二级、第三级、第四级荷载时,沉降值分别为 75、110、140 mm。前四级荷载的作用下,沉降都较为均匀,沉降的产生主要是因为土体的压缩固结所引起的。但当施加第五级荷载时,沉降出现突变,沉降值从 140 mm 增大至 450 mm。这说明,当 CFG 桩体为 15 m 时,在本次荷载的施加过程中,复合地基达到其承载能力极限,发生了较大的塑性变形,使得沉降骤增,此时沉降主要是由于土体中塑性区的产生而导致的。此级荷载值约为 218 kPa。

当桩长为 17 m;施加第一级荷载时,沉降值约为 40 mm,与桩长为 15 m 时的该级沉降相差不大;

当施加第二级、第三级、第四级、第五级荷载时,沉降值分别为 50、68、105、150 mm。即在每个荷载步沉降的变化值都较为均匀,地基的承载力较大,没有发生剧烈的变形。

当桩长为 18 m 时,荷载为一次性施加,沉降急剧增加,然后随着土体固结的进行,沉降值趋于平稳,最终稳定在 170 mm。

当桩长为 19 m 时,荷载同样为一次性施加,但沉降极为缓慢,全过程曲线近似于平滑曲线,终值为 90 mm。

由图 6 可知:在桩长较短时,桩长的增大可以大大减小地基的沉降值,增强地基加固效果。不同桩长时地基出现塑性变形的临界荷载值也不同。在 CFG 复合地基中地基强度的主要控制因素为 CFG 桩体的桩长。端承桩对于地基的加固效果比摩擦桩更为直接和有效。19 m 的桩长已经接近硬土层,发挥了近似端承桩的作用。

3.3.2 桩 径

桩径对沉降的影响见图 7。

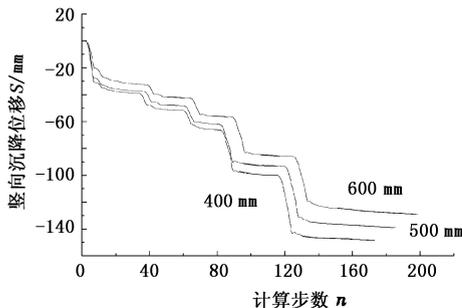


图 7 桩径对沉降的影响

Fig. 7 Effects of pile diameter on vertical settlement

由图 7 可知:CFG 复合地基中单桩直径的增大有利于减小竖向沉降和增强地基的稳定。当桩径从 400 mm 增大到 600 mm 时,罐底中心的沉降值分别为 150、140 和 120 mm。在规范规定的范围内,适当地增大桩径可以轻微减小竖向沉降。但是抑制竖向沉降的作用不如桩长的作用明显。

3.3.3 桩间距

在其他建模参数不变的情况下,通过改变 CFG 桩复合地基中桩间距,分别研究其加固效果(图 8)。

由图 8 可知:当桩间距为 2.5 m 时,在第一级荷载的作用下,沉降约为 70 mm;当施加第二级后,沉降变为 90 mm;当施加第三级后,此时的荷载值为 145 kPa,由于此时的荷载值超过了复合地基的承载力,因此在此级荷载中,沉降出现突变,沉降值变为 250 mm;当施加第四级和第五级荷载时,沉降的变

化趋于稳定,最终沉降值为 450 mm。

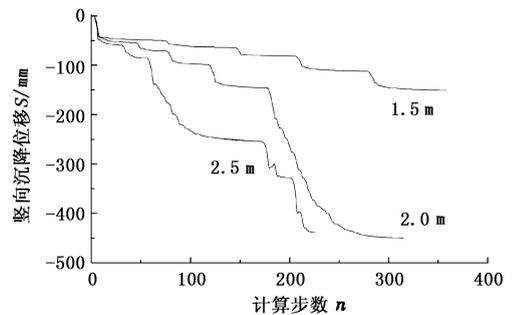


图 8 桩间距对沉降的影响

Fig. 8 Effects of spacing on vertical settlement

当桩间距为 2.0 m 时,在第一级荷载的作用下,沉降约为 60 mm;当施加第二级、第三级、第四级后,沉降变为 70、90、130 mm;前四级荷载的沉降变化都较为均匀。但当施加第五级荷载时,此时的荷载值为 218 kPa,超过了复合地基承载力标准值,土体发生巨大的沉降,沉降值急速增加至 460 mm。

当桩间距为 1.5 m 时,CFG 复合地基的加固效果很好,此时的地基承载力标准值为 367.13 kPa,远远大于施加荷载的最大值 218 kPa。因此,当桩间距为 1.5 m 时,沉降变化很小:当施加第一级、第二级、第三级、第四级和第五级荷载时,沉降值分别为 40、60、80、110、150 mm。

由此可见,地基土的沉降随桩间距的增大迅速增大。桩间距是影响复合地基的承载力的最主要因素,因为它的改变会使得桩土置换率发生较大的变化,而桩土置换率又是决定复合地基承载力的最主要因素。作为影响油罐地基的加固效果的重要因素,应慎重选择桩间距。

4 结 论

(1) CFG 复合地基对于软弱土层上的油罐地基能起到很好的加固效果,能够有效地限制罐体的平面和非平面倾斜、控制平面和非平面沉降,较好地限制上部荷载的作用范围。

(2) 在竖向荷载的作用下,由于 CFG 桩体的刚度较大,桩身横向变形很小,限制土体侧向位移的效果较好。可以较好地限制上部荷载的作用范围和地基隆起的产生。

(3) 在 CFG 复合地基中,水平向位移的最大值出现在地基地面处。

(4) CFG 桩复合地基中,桩长和桩间距是控制竖向沉降和加固效果的主要因素。

参考文献:

- [1] 罗轶锋. 滩涂地区储罐基础优化设计[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(1): 38-39.
LUO Yi-feng, Optimum design of shoals area tank foundation [J]. Oil-gas Fields Surface Engineering, 2006, 25(1): 38-39.
- [2] 浙江省建设厅. DB33/1051-2008 复合地基技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [3] 程旭东, 马红, 刘永红. 软土地区储罐群地基沉降的三维数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 101-104.
CHENG Xu-dong, MA Hong, LIU Yong-hong. Three-dimensional numerical simulation of foundation settlement of storage tank group in soft soil area [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6): 101-104.
- [4] 袁文明, 戴济群, 黄康理, 等. 超深水泥拌搅桩处理大型油罐软弱地基的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 63-66.
YUAN Wen-ming, DAI Ji-qun, HUANG Kang-li, et al. Experimental study of the ultra-deep cement agitator pile for the weak foundation of the large oil tank [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(1): 63-66.
- [5] 张震. 某大型储油罐 CFG 桩复合地基的设计与施工[J]. 岩土工程界, 2009, 12(1): 76-77.
ZHANG Zhen. Design and construction of CFG pile composite foundation of a large storage tank [J]. Geotechnical Engineering, 2009, 12(1): 76-77.
- [6] 唐彤芝. CFG 桩复合地基加固深厚软基理论研究与应用[D]. 南京: 南京水利科学院, 2007.
TANG Tong-zhi. Study on the composite foundation with CFG-pile for improving thick and soft ground [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007.
- [7] 韩焯, 李宁. 复合地基中群桩相互作用机制的数值试验研究[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 75-79.
HAN Xuan, LI Ning. Numerical simulation test on interaction mechanism of group pile composite foundation [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 75-79.
- [8] 张建伟, 原华, 孔德志. CFG 桩复合地基褥垫层效用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(s2): 460-463.
ZHANG Jian-wei, YUAN Hua, KONG De-zhi. Finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(s2): 460-463.
- [9] 贾庆山. 储罐基础工程手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.
- [10] 王帅. 软弱地基上储油罐群的工后沉降可靠性研究[D]. 青岛: 中国石油大学储运与建筑工程学院, 2012.
WANG Shuai. Reliability research about post-construction settlement of soft foundation under tank group effect [D]. Qingdao: College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, 2012.
- [11] 国家发展与改革委员会. SH/T3068-2007 石油化工钢储罐地基与基础设计规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
- [12] 住房和城乡建设部. GB50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] 住房和城乡建设部. JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
(编辑 沈玉英)

(上接第 130 页)

- [16] 常晓林, 胡超, 马刚, 等. 模拟岩体失效全过程的连续-非连续变形体离散元方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2004-2011.
CHANG Xiao-lin, HU Chao, MA Gang, et al. Continuous-discontinuous deformable discrete element method to simulate the whole failure process of rock masses and application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2004-2011.
- [17] 李强, 杨庆, 栾茂田, 等. 曲线翼型裂纹扩展路径理论分析及试验验证[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 345-349.
LI Qiang, YANG Qing, LUAN Mao-tian, et al. Study of curved wing crack path by theory and testing methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 345-349.
- [18] 赵延林. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2009.
ZHAO Yan-lin. Coupling theory of seepage-damage-fracture in fracture rock masses and its application [D]. School of Resources and Safety Engineering in Central South University, 2009.
(编辑 沈玉英)