

非滑道区 LNG 组块建造地基 不均匀沉降分析*

石继程¹, 孟 珣^{2*}, 刘宇婕¹, 徐学军¹, 田会元²

(1. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要:针对既有海工场地非滑道区大型 LNG 组块一体化建造需求,根据场地地基历史检测勘察资料和拟建组块特点,采用有限元参数化建模技术(ANSYS-APDL)模拟了地基非线性应力应变关系及项目整体建造过程中地基沉降状态,通过敏感性分析确定复杂土体参数对地基沉降的影响程度,用以指导参数选择。研究表明:非滑道区场地地基不均匀沉降会对大型结构的建造存在影响,其主要地基影响参数为场区第一层土的弹性模量和基础荷载量级。通过数值模拟手段获取建造过程中地基沉降的相对不均匀性参数既可以与实测结果进行比较,又可以获取预报值用以及时指导施工安装及临时加固措施。

关键词:ANSYS 参数化设计语言;非滑道区;地基;不均匀沉降;液化天然气储存装置

中图分类号: U656.1

文献标识码: A

海洋开发需求使得海工结构物组块呈现大型化、复杂化特点。近日,中海油在南海发现大型油气田,深海万亿大气区正走进现实,LNG 建造安装技术日益成为研究热点,并有着广泛的应用需求^[1-2]。适应该发展趋势的特殊建造要求给既有海工施工场地提出新的挑战^[3-5]。

研究选用的超大型 LNG 管廊结构,因其占地面积大、不适宜滑道建造等原因,决定了其与海工建造场地设置常规组块产品有较大区别^[6-7]。考虑非滑道区填土地基不均匀性,以及工程建造周期长、工艺复杂等原因,仅靠单一的地基承载力试验得到的数据是不全面的,因此有必要对于非滑道区建造的大型结构与地基不均匀沉降问题的作用机制进行研究,用以保障建造精度和安全生产。

1 工程概况

研究选址为海洋石油工程青岛有限公司青岛制造场^[8]。该场位于胶州湾南端薛家岛,其东、南、西三面受海西半岛环抱,具有良好的自然避风条件。场地总面积约 90 万

* 收稿日期:2015-04-07

资助项目:国家自然科学基金项目——深水大兆瓦风机新型浮式支撑结构关键技术及多准则决策研究(51309209)

作者简介:石继程(1981-),男,工程师,硕士,主要从事海洋工程结构物设计及建造安装分析方面研究。E-mail: shijc@mail-cooec.com.cn

* 通讯作者:孟 珣(1973-),女,副教授,博士,主要从事船舶与海洋工程结构物力学特性研究及综合评价方面研究。E-mail: mengxun@ouc.edu.cn

(王佳实 编辑)

m^2 ,填海总造地面积约 80 万 m^2 。场地目标产品为钢质桩基式平台、FPSO 以及深水浮式平台(TLPs,Spars)等海洋石油工程产品。场地设置产品总装下水滑道 4 组:1#滑道(设计生产能力 4 000 t),2#滑道(设计生产能力 12 000 t),3#滑道(设计生产能力 8 000 t),4#滑道(设计生产能力 30 000 t)。LNG 管廊模块 ICHTHYS 项目选用 3#滑道与 4#滑道之间的非滑道区。场地平面布置图见图 1。

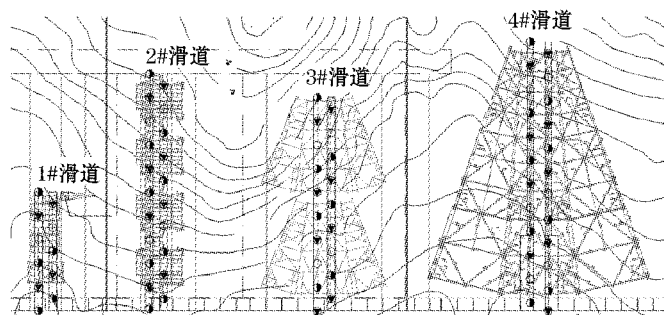


图 1 海工场地平面布置示意图

Fig. 1 Layout of the marine construction site

2 研究基础资料

2.1 场地地质情况

根据场地建设时期的岩土工程勘察报告,场地为 2005—2007 年填海造地经过强夯处理形成的。在强夯地基土的上部铺设了 0.5 m 厚的块石垫层,块石直径 0.2~0.5 m。场地地层主要有素填土(碎石素填土和粉质黏土素填土)、淤泥、残坡积土(粉质黏土混砂砾)和基岩。第四纪地层厚度 6.3~19.7 m。

第 1 层:素填土和淤泥。其中碎石素填土主要为开山石和风化砂,级配差。碎石素填土厚度 6.3~17.1 m,层底标高-3.21~-11.27 m,原位标准贯入试验击数均大于 50 击。在碎石填土的下部,局部为粉质黏土素填土,混有数量不等的碎石,厚度 2.6~6.2 m,原位标准贯入试验击数 17~25 击。在素填土下部还存在一定数量的淤泥,局部缺失,厚度 0.1~3.0 m,原位标准贯入试验击数 1~3 击,由于该层常混有碎石,混碎石处标准贯入击数大于 50 击。

第 2 层:褐黄色、棕黄色粉质黏土、黏土混砂砾,可塑硬塑状态。砾石、碎石主要为花岗斑岩,含量不均匀,风化程度差异较大。该层分布不连续,层厚 0.0~2.0 m。原位标准贯入试验击数 13~29 击。

第 3 层:基岩,工区基岩主要为花岗斑岩,局部存在煌斑岩和安山玢岩。基岩面埋深 15.9~19.0 m。

2.2 地基勘察资料

场地承载力试验工作采用平板载荷试验的方法进行,试验板面积 0.25~10.50 m^2 ,最大加荷 800~4 000 kPa。根据进行的承载力检测试验结果分析,场地极限承载力大于 4 000 kPa,承载力特征值可以达到 2 000 kPa,承载力特征值对应的沉降为 1.19~53.05 mm。由于现有场地地基土为回填碎石土,各试验点沉降差别较大。图 2 为厂区历史地基检测荷载

试验位置(ICNHTHYS1~ICHTHYS5)及3#和4#滑道间非滑道区 400 kPa 荷载作用下地基沉降等值线图。

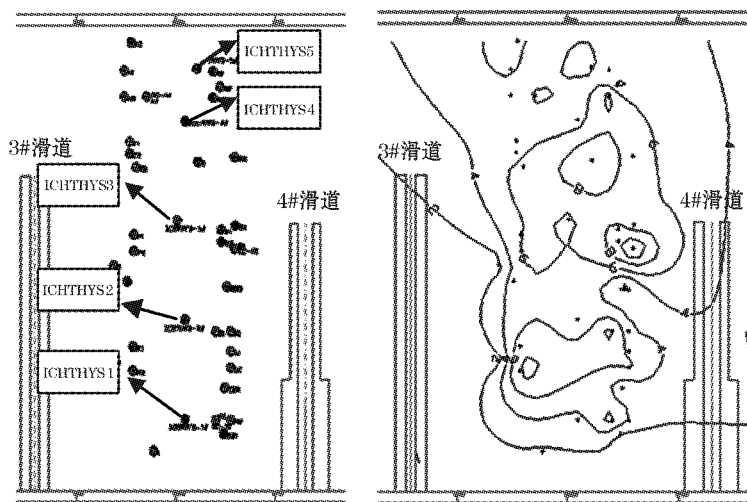


图2 荷载试验位置及 400 kPa 荷载作用沉降等值线图

Fig. 2 The position of load test and the contour plot of settlement under 400 kPa load

2.3 上部组件情况

非滑道区拟建组件为陆上液化天然气 LNG 管廊结构。该模块由 8 个子组件 A1PA ~A2PD 组成,其在非滑道区的布置如图 3 所示。覆盖宽度约为 100 m,长度约为 400 m。

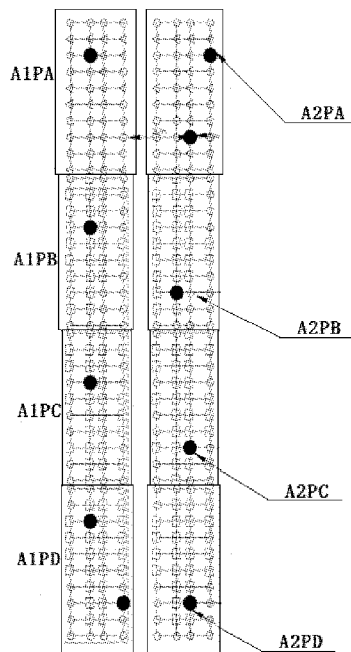


图3 ICHTHYS 项目建造平面布置示意图

Fig. 3 Layout of the construction of ICHTHYS project

LNG 廊道模块为多层空间刚架结构,构件类别多,连接贯通形式复杂,有严格的施工工艺工序要求。单个子模块的设计净重约为 6 500 t,其中项目子模块 A2PD 结构示意图如图 4 所示。

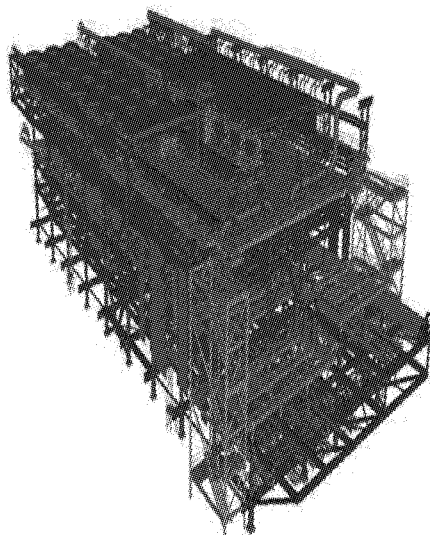


图 4 项目子模块 A2PD 结构示意图

Fig. 4 Configurations of the sub-module A2PD

3 有限元模型

地基不均匀沉降分析中,岩土介质的力学性质非常复杂,影响其应力和变形的因素也很多,例如岩土的结构、孔隙、密度、历史应力、荷载特征、孔隙水及时间效应等,在如此多的因素作用下要获取理论解几乎是不可能的。对于建造在非滑道区的大型组件,土体与结构的相互作用直接影响到结构的受力及变形情况,过去限于计算方法,结构设计中对于土体与结构的相互作用以及地基的沉降,只能作一些粗糙的假定,使得计算结果与实际情况差距甚远。采用 ANSYS 有限元中的岩土 DP 模型和接触技术考虑地基与结构相互作用的非线性应力-应变关系,可以合理反映实际情况。

3.1 Drucker-Prager(DP)土模型

岩石和土壤材料受压屈服强度远大于受拉屈服强度,且材料受剪时,颗粒会膨胀,常用的 VonMises 屈服准则不适用于这类材料。能准确描述这类材料的强度标准为 Drucker-Prager 准则,使用该准则的材料简称为 DP 材料。

Drucker-Prager 屈服准则是对 Mohr-coulomb 准则的近似,用以修正 VonMises 屈服准则,即在 VonMises 表达式中包含一个附加项。其流动准则既可以使用相关流动准则,也可以使用不相关流动准则,其屈服面并不随着材料的逐渐屈服而改变,因此没有强化准则,然而其屈服强度随着侧限压力的增加而相应增加。对于 DP 材料,当材料参数给定后,屈服面为一圆锥面,此圆锥面是六角形的 Mohr-coulomb 屈服面的外切锥面(图 5)^[9]。

3.2 接触问题

实际工程中,上部管廊结构组件通过钢结构墩垫即基础将结构自重及施工安装过程

中的环境荷载及工作荷载传递给地基。墩垫结构与地基的相互作用是一种高度非线性行为,其接触状态随荷载、材料、边界条件等发生变化,同时也存在摩擦非线性问题。研究取墩垫底面积作为目标刚性接触面,单元类型为 TARGE170;第一层土层的顶表面作为柔性接触面,单元类型为 CONTA173。采用面面接触的方式来模拟墩垫与地基的接触效果。

3.3 ANSYS 参数化模型

利用 APDL (ANSYS Parametric Design Language) 与宏技术组织管理 ANSYS 有限元命令,可以实现参数化建模、施加参数化荷载与求解以及参数化后处理结果的显示,从而实现参数化有限元分析的全过程,这也是 ANSYS 批处理分析的最高技术。在参数化的分析过程中简单地修改其中的参数即可修改各种尺寸、不同荷载大小,生成多种设计方案,可以极大地提高分析效率、减少分析成本。

依据项目特点,研究拟设下述类别参数:基础参数定义墩垫底板的长、宽、高用以讨论接触面积对沉降的影响;土体参数包含土层分类、各层的厚度及物理力学参数。参照地质报告及检测资料,沉降计算深度取至基岩表面,即模型取基岩上两个土层,其厚度分别为 6.4~20.1 m 和 0.0~2.0 m。各土层的计算参数主要包括 DP 材料的黏聚力 c ,内摩擦角 ϕ ,膨胀角 ψ ,保守做法本计算中土层膨胀角取 0。土层的弹性模量依据现场检测的变形模量获取,泊松比根据土体特征假设。表 1 中列出地

基不均匀沉降分析模型中定义参数类别,其中各参数值都可调整。单个墩垫基础底板与地基整体分析 1/4 对称体几何模型及有限元模型如图 6 所示,实体单元类型为 SOLID45。

表 1 地基不均匀沉降模型分析参数

Table 1 Parameters for the uneven foundation settlement model

参数名称	数值
基础长宽高	1.5 m×1.5 m×0.5 m
分析维度	4
土层厚度	土层 1:14.5 m;土层 2:1.0 m
单元尺度	0.25 m
荷载	50~400 MPa
土层 1 参数	c :327 kPa; ϕ :15°; ψ :0°;弹性模量:34~125 MPa;泊松比:0.2
土层 2 参数	c :150 kPa; ϕ :30°; ψ :0°;弹性模量:250 MPa;泊松比:0.35

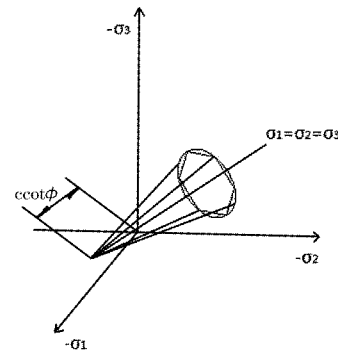


图 5 Drucker-Prage 屈服面^[9]

Fig. 5 Yield surface of Drucker-Prage^[9]

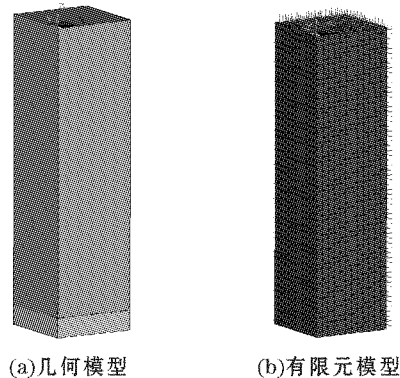


图 6 地基沉降分析模型

Fig. 6 Analysis model of foundation settlement

4 分析结果

4.1 测点地基沉降值

根据 ICHTHYS 项目建造厂区 1# 地基试验数据,采用上述有限元分析模型所得到的不同基础底面积、不同均布荷载作用下的地基沉降值列于表 2。

表 2 地基沉降值(mm)
Table 2 Values of foundation settlement(mm)

荷载/ kPa	沉 降						
	0.5 m×0.5 m	0.75 m×0.75 m	1.0 m×1.0 m	1.25 m×1.25 m	1.5 m×1.5 m	1.75 m×1.75 m	2.0 m×2.0 m
400	3.1	6.2	7.4	10.5	12.0	16.0	18.0
600	4.6	9.2	11.1	15.7	18.0	24.0	27.0
800	6.1	12.3	14.8	20.9	24.0	31.9	36.0
1 000	7.7	15.4	18.4	26.1	30.0	39.8	45.0

400 kPa 均布荷载作用下该位置基础沉降值为 12 mm,与图 2 中该位置检测沉降值 8 mm 接近。沉降云图如图 7 所示,位移云图变化表明计算分析范围即土体长度、宽度及土层深度取值合理。根据表 2 数据的分析结果见图 8,对应相同均布荷载效应,地基的沉降值随着基础尺度的增大而增大,即对重型结构不能单纯依赖增加单个墩垫的平面尺度来达到减小最终沉降的目的。

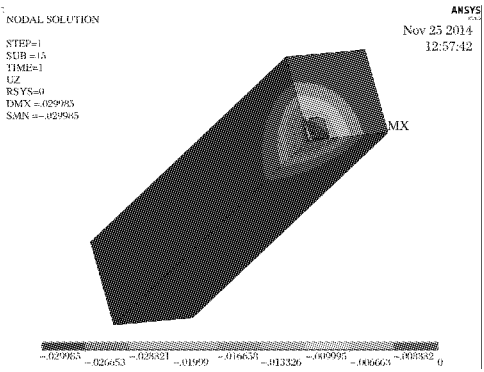


图 7 400 kPa 荷载 1.5 m×1.5 m 基础地基沉降位移图
Fig. 7 1.5 m×1.5 m foundation settlement under 400 kPa load displacement nephogram

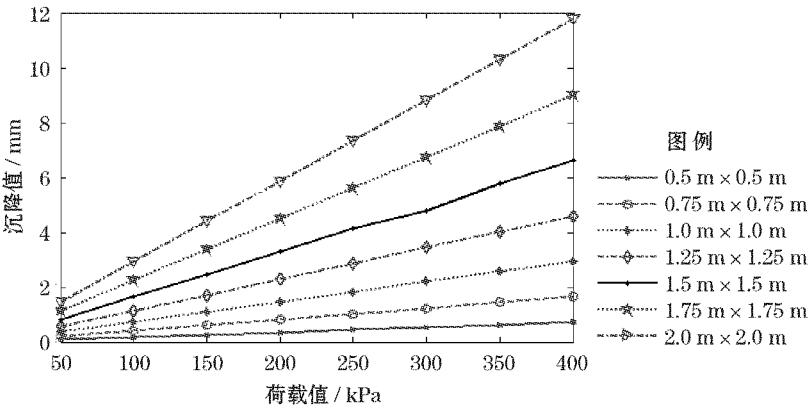


图 8 不同等级荷载对应不同基础尺度时地基沉降
Fig. 8 Foundation settlement occurring when different load magnitudes correspond to different foundation dimensions

4.2 设计参数敏感性

计算模型的各项参数对基础沉降影响的重要性程度有所不同。结合敏感性分析结果可以找到影响沉降的关键因素,为最终设计沉降监测方法及抑制措施提供依据。本文结合分析模型设置参数考证基础、外荷载、土体材料参数对地基沉降的敏感性。控制影响度指标5%所得到的各个参数相对于地基沉降的敏感性指标见图9。

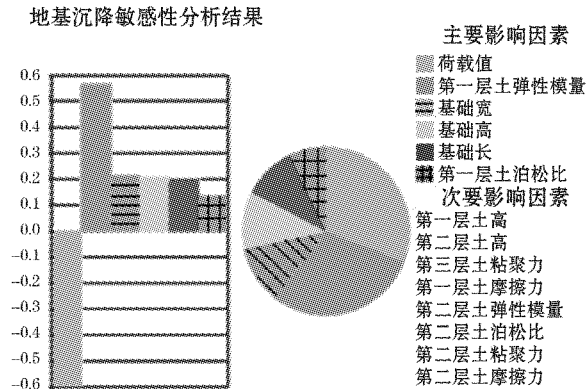


图9 分析参数对地基沉降影响敏感度指标

Fig. 9 Sensitivity index of the influence of parameters on foundation settlement

由图9可见,本分析对于控制基础沉降最为敏感的参数主要为荷载值和第1层土体的弹性模量;其次为基础尺度参数,如墩垫底板的长、宽、高等;其他相关的土体力学物理参数,如土层厚度、第2层土的参数等对沉降影响不显著。

图10,11为上述重要性参数:均布荷载值及第1层土体弹性模量的概率密度模拟结果。荷载参数均值400 kPa、1.5 m×1.5 m基础底板、第1层土弹性模量均值参照检测值确定,假设方差为相应参数均值取值的1%,比较各参数变化对地基沉降的影响。从曲线轮廓和迭代拟和的结果可见,数值分析迭代合理。

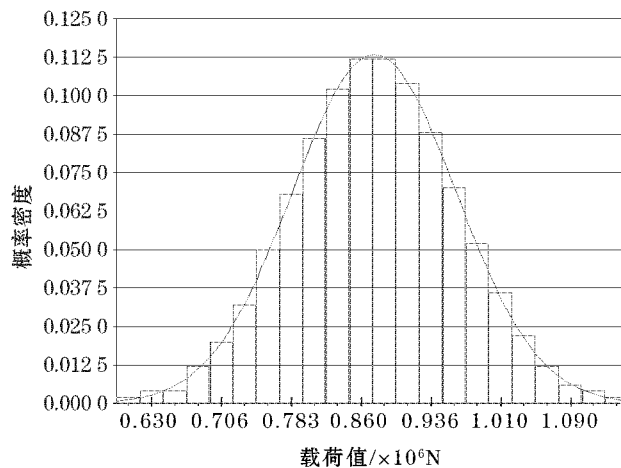


图10 荷载概率分布

Fig. 10 Probability distribution of loads

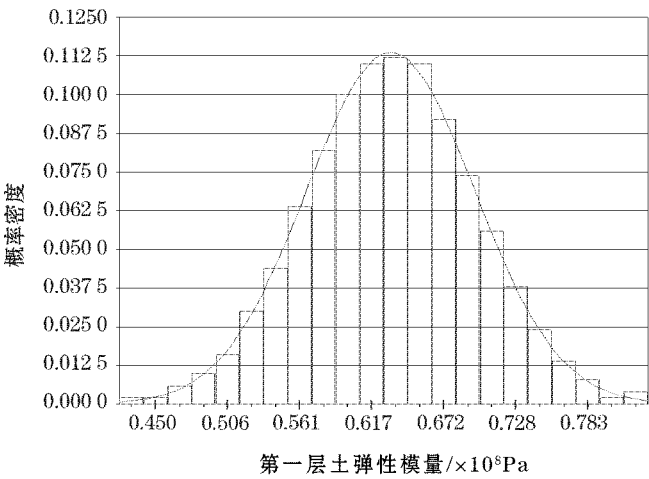


图 11 第 1 层土体弹性模型概率分布

Fig. 11 Probability distribution of the elastic modulus of the first soil layer

4.3 场区不均匀沉降

根据 ICHTHYS 项目建造厂区范围及各模块的特点,参照上述参数敏感性程度,取土层 1 对应不同弹性模量结果下单位墩垫的沉降差值,评估场区不均匀沉降对上部结构影响程度。墩垫尺度为 1.5 m×1.5 m。考虑建造安装荷载,取单个管廊模块重力为 6 500 t,不考虑偏心影响下,设计假设 40 个墩垫每个分配载荷为 722.2 kPa。由表 3 可见,现有假设条件下,ICHTHYS 场区单个墩垫下最大沉降值为 26 mm,沉降净值符合建造要求,但其不同区块存在明显的不均匀性,最大差值比达到 229%。

表 3 ICHTHYS 场区地基不均匀沉降值

Table 3 Values of uneven foundation settlement at ICHTHYS site

场区位置	变形模量/MPa	沉降数值/ mm	差值比/ %
ICHTHYS1	58~83	16.0~11.5	39.1
ICHTHYS2	46~85	19.7~11.2	75.9
ICHTHYS3	34~125	26.0~7.9	229.1
ICHTHYS4	42~82	21.4~11.6	84.5
ICHTHYS5	50~94	10.2~18.2	78.4

5 结 论

- 1)海工大型组块大范围场地一体化建造安装,除了考虑单位净沉降值外,应关注场区同一组块及相邻组块的相对不均匀沉降差,并应对加工组件进行施工过程中地基不均匀沉降影响分析,以减少组装构件的内应力和安装误差,提高建造精度保证生产安全。
- 2)对于场地非滑道区,由于地质情况复杂,分析模型应做参数敏感性分析,用以确定影响分析指标的关键控制因素,以指导相关控制参数的选择和施工方案的确定。
- 3)大体积重型组块建造安装应合理优化选择墩垫基础的平面布置及结构形式,不能单纯依赖增加单个墩垫基础的尺度来达到减小地基沉降。

参考文献:

- [1] 顾安忠, 石玉美, 汪荣顺. 中国液化天然气的发展[J]. 石油化工技术经济, 2004, (1): 1-5.
- [2] 张耀光, 刘桂春, 刘锴, 等. 中国沿海液化天然气(LNG)产业布局与发展前景[J]. 经济地理, 2010, 30(6): 881-885.
- [3] 张志勇. 韩国发展 LNG 建造的历史经验[J]. 船舶贸易经济, 2004, (6): 6-8.
- [4] WANG X Y, YUANG P, LUO H B, et al. An innovative method for project control in LNG project through 5D CAD: A case study[J]. Automation in Construction, 2014, 45: 126-135.
- [5] WANG X Y, MARTIJN T, HOU L, et al. Integrating augmented reality with building information modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry[J]. Automation in Construction, 2014, (40): 96-101.
- [6] 王阔, 宴星慧, 刘广辉, 等. Spar 平台建造的滑道承载力分析[J]. 中国造船, 2011, 52(增刊 2): 91-97.
- [7] 李越松. 大型海洋石油平台组块滑移装船过程中滑道结构安全性评价[J]. 水道港口, 2006, 27(增刊): 45-48.
- [8] 徐东晖, 王星球, 濮文菁. 中国海洋石油工程青岛海工建造基地工程设计及地基处理研究[J]. 水运工程, 2009, 431(8): 75-80.
- [9] 石卡. 基于 ANSYS 的岩土参数优化反分析和边坡和边坡稳定性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 30-32.

Uneven Settlement Analysis of the Foundation of LNG Modules Constructed in Non-Slideway Zone

SHI Ji-cheng¹, MENG Xun², LIU Yu-jie¹, XU Xue-jun¹, TIAN Hui-yuan²

(1. Offshore Oil Engineering CO. LTD(Qingdao), Qingdao 266000, China;

2. Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: According to the demands of integrated construction of large-scaled LNG modules in non-slideway zone at marine construction site, and based on the historical foundation data and the features of the modules to be constructed, the finite element analysis with parametric modeling technology (ANSYS-APDL) is conducted to simulate the non-linear stress-strain relationship and the settlement state of the foundation in the whole stage of model construction. For guiding the selection of parameters, the influence of the complicated parameters of soil mass on the foundation settlement is determined through sensitivity analysis. The results indicate that the uneven settlement of the foundation in the non-slideway zone could influence the construction of large-scaled structures. The major influencing factors are the elastic modulus of the 1st soil layer and the load pressure of foundation. The relative inhomogeneity of the foundation settlement occurring in the construction and obtained by means of numerical simulation can either compare with the measured results, or acquire the prediction values of foundation settlement, so that the installation and temporary reinforcement can be guided in time.

Key words: ANSYS Parametric Design Language (APDL); non-slideway zone; foundation; uneven settlement; LNG