

# 现代气压沉箱施工过程的三维有限元分析

彭芳乐<sup>1,2</sup>, 贾建伟<sup>1</sup>, 王海林<sup>3</sup>, 李耀良<sup>4</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008; 4. 上海市基础工程公司, 上海 200002)

**摘要:** 从开挖卸荷、刃脚挤土、沉箱-土体侧摩擦作用三方面对气压沉箱施工引起的土体扰动进行分析, 并结合工程实例, 对气压沉箱施工全过程进行三维有限元数值模拟。通过与现场监测数据的比较, 验证了三维计算模型及数值模拟方法的合理性和有效性。结果表明: 沉箱侧壁边缘处地表沉降最大; 随着沉箱下沉, 地表沉降逐渐增大, 沉降影响范围随之扩大; 沉箱周边土体的水平位移较小, 浅层土体偏向沉箱移动, 深层土体偏离沉箱移动; 考虑刃脚挤压扰动可以有效减小沉箱边缘处最大地表沉降。

**关键词:** 气压沉箱; 土体扰动; 地层变形; 三维模拟

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

## 3D-FEM Analysis on Modern Pneumatic Caisson Construction

PENG Fangle<sup>1,2</sup>, JIA Jianwei<sup>1</sup>, WANG Hailin<sup>3</sup>, LI Yaoliang<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410008, China; 4. Shanghai Foundation Engineering Cooperation, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** Combined with the construction example, the 3D-FEM simulation with a consideration of the soil disturbance during construction was proposed to predict the soil movements induced by the new pneumatic caisson method construction. The calculated soil movements were examined and verified by the field measurements. The results indicate that the maximum surface settlement exists in the caisson wall edges. During the caisson sinking progresses, the settlement increases and the influence zone on the ground surface is widened gradually. The subsurface horizontal displacements

are small and vary along depths. The shallow soils tend to move towards the caisson and the maximum displacement occur to the surface, whereas the deep soils tend to move away from the caisson. Finally, the effects of several parameters which might affect the ground deformation were investigated. It can be concluded that the surface settlements close to the caisson walls are reduced significantly because of the compacted zone existence.

**Key words:** pneumatic caisson; soil disturbance; ground deformation; three-dimension simulation

近些年来,随着技术的不断革新,以地面遥控挖排土、信息化施工等为特点的现代气压沉箱工法得到了越来越广泛的应用,在国外被广泛用于桥梁基础、隧道竖井以及其他地下设施的建设<sup>[1]</sup>。2007 年该施工方法在我国上海地铁某盾构隧道中间风井施工中首次得到成功应用<sup>[2]</sup>。图 1 所示为现代气压沉箱工法概貌。

沉箱挖掘机吊装在沉箱底板下方,可沿轨道来回移动,施工人员借助于远程视频监控和三维地貌显示技术,在地面遥控操作工作室内的挖排土作业,工作室内的气压可根据开挖面的水位自动调整。施工实践表明,远程遥控气压沉箱施工安全性好,适用于各种地质条件,对周边地层扰动小,几乎不影响地下水环境<sup>[3]</sup>。然而,随着气压沉箱施工技术在城市软土地区的推广应用,特别是在地质条件复杂、近距离施工、大深度开挖的情况下,如何有效地预测和控制沉箱周边土体位移,逐渐成为一个新挑战。因此,定量地分析和预测气压沉箱施工中周边土体的受力、变形规律有着非常重要的现实意义。

目前国内外针对气压沉箱施工引起周边环境效应的研究成果还很少。日本的一些研究人员主要采

收稿日期: 2013-04-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ01B04); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)

第一作者: 彭芳乐(1965—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为岩土力学、地下空间与工程等。

E-mail: pengfangle@tongji.edu.cn

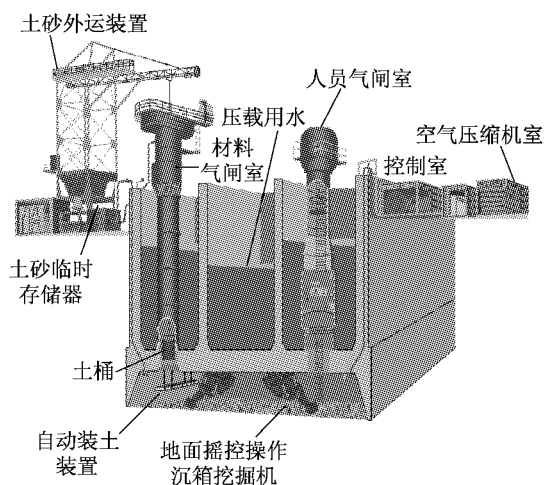


图1 现代气压沉箱工法概貌

Fig.1 Overview of the modern pneumatic cassion

用数值计算和现场监测两种手段对气压沉箱施工引起的周边地层变形进行了调查分析。梅田等<sup>[4]</sup>考虑沉箱自重、侧摩阻力、气压作用以及沉箱刃脚反力之间的相互关系,提出了一个简化的土体力学模型,用于计算沉箱施工过程中周边地层变形,并通过有限元分析和现场实测资料,认为沉箱周边土体的稳定性、地表沉降与工作室内气压密切相关。井上等<sup>[5]</sup>进一步指出,地层杨氏模量与深度相关联,沉箱侧摩阻力的存在可以很好地解释有限元分析结果。但是,为简化分析,以上方法均假定土体材料应力-应变关系为线弹性,且有限元模型中不直接考虑沉箱结构。此外,Hong等<sup>[6]</sup>采用理论分析和现场监测手段研究了气压沉箱侧摩擦力的分布情况,结果表明侧摩擦力沿深度以抛物线形式减小,并且使用Kn法比 $\lambda$ 法更适合预测大型气压沉箱侧摩擦力的分布。然而,该研究中介绍的气压沉箱施工实例所在地层由海底沉积土、风化残积土、风化岩层、基岩组成,与上海典型软土地区地质条件完全不同。王海林等<sup>[7]</sup>曾结合上海的气压沉箱风井施工实例,在仅考虑沉箱竖向受力平衡的前提下,提出用于分析施工全过程的周边地层变形力学模型,并基于该模型进行了二维非线性有限元分析。但该计算模型没有包括沉箱结构本身,也没有考虑实际问题的三维空间效应,因而不能获得沉箱与周边土体的相互作用性状。此外,气压沉箱施工是一个下沉、接高交替进行的动态过程,沉箱周边土体在施工中承受反复的扰动,而这些情况在二维有限元分析中均没有考虑。

本文将深入分析气压沉箱施工过程中的土体扰动效应,并以上海某盾构隧道竖井为研究对象,提出

考虑土体扰动的气压沉箱施工三维有限元数值分析方法,对施工过程中周边土体受力、变形规律进行总结,并结合现场实测数据以及二维有限元计算结果,对其合理性进行验证,最后对扰动参数进行敏感性分析。

## 1 研究背景及工程概述

本文所介绍的竖井工程为上海地铁7号线盾构隧道工程的一部分,完工后作为盾构工作井使用,隧道运营阶段为中间风井。该工程为国内首次采用现代气压沉箱工法,其主体为全埋地下四层结构(竖向剖面如图2所示),平面外包尺寸为25.24 m×15.60 m,工作室净高3.0 m,底板厚1.6 m,沉箱总下沉深度 $h$ 为29.06 m。沉箱上两层壁厚1 200 mm,下两层壁厚1 600 mm,此外,在长、短边处均设了中隔墙或框架以增加整体刚度,便于隔仓充水加重及纠偏。考虑到施工场地位于上海软土地层,为减小对周边环境的影响,没有设置减摩台阶。

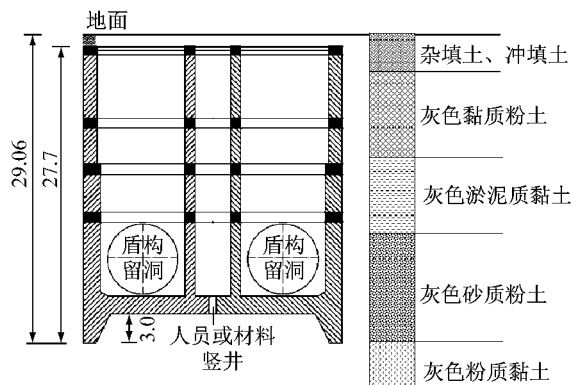


图2 沉箱立面图(单位:m)

Fig.2 Profile of shaft (unit:m)

施工场地为滨海平原地貌类型,根据地质勘察结果,场地土层自上而下分别为:填土层(①)、黏质粉土层(②<sub>3</sub>)、淤泥质黏土层(④)、砂质粉土层(⑤<sub>1</sub>)、粉质黏土层(⑤<sub>2</sub>)。其中,④层为饱和和流塑性土,地基承载力低,具有触流变特征;②<sub>3</sub>及⑤<sub>2</sub>层渗透性较好,在一定的动水压力作用下易产生流砂、管涌等不良地质现象。各土层物理力学参数如表1所示,其中,土体强度参数 $c, \varphi$ 为固结不排水强度参数,取自直剪固快试验结果。

沉箱结构分六节制作,四次下沉,结构浇筑前进行浅层基坑开挖,然后浇筑前三节,分别为刃脚(2.5 m)、工作室顶板(1.6 m)、箱体接高(3.5 m)。后三节浇筑高度分别为4.20、8.80、8.46m,每浇筑一节

表 1 各土层物理力学参数

Tab.1 Physico-mechanical parameters of soils at the site

土层	层厚/m	$\gamma'/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	直剪固快试验		$E_s/\text{MPa}$	$k_v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_H/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
			$c/\text{kPa}$	$\phi/(\circ)$			
黏质粉土	7.5	9.3	9	25.0	5.98	—	—
淤泥质黏土	6.0	8.2	14	10.0	2.01	$3.49 \times 10^{-7}$	$5.49 \times 10^{-7}$
砂质粉土	10.5	9.2	6	30.0	3.80	$9.48 \times 10^{-5}$	$1.05 \times 10^{-4}$
粉质黏土	未钻穿	9.0	19	18.0	3.44	$1.59 \times 10^{-6}$	$1.52 \times 10^{-6}$

注:  $\gamma'$  为有效重度,  $E_s$  为压缩模量,  $k_v$  和  $k_H$  分别为竖向和水平渗透系数。

下沉一次,每次下沉深度分别为 4, 20, 8.80, 10.06 m.

施工过程中在沉箱周围布置监测点,对周边地表沉降和土体水平位移进行现场监测.如图 3 所示,地表沉降监测点间距为 5.0 m,见图中 D1- $i$ ~D4- $i$  ( $i=1\sim6$ ) 监测点;土体水平位移测孔共设置七个,沉箱西侧设置四个测孔 T1~T4,距离沉箱水平距离分别为 5, 15, 20, 25 m,沉箱北侧设置三个测孔 T5~T7,距离沉箱水平距离分别为 5, 15, 22 m,测孔深度均为 35 m,可测得 35 m 以内不同深度处的土体水平位移.

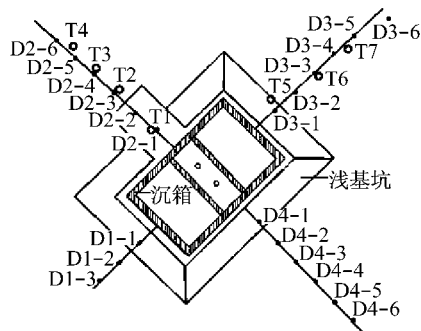


图 3 现场监测点布置图

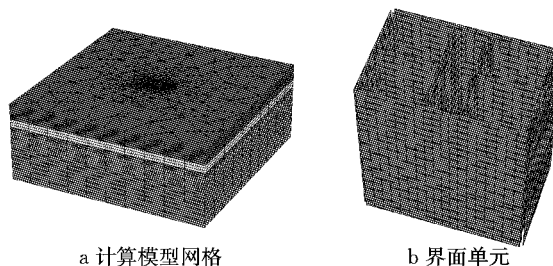
Fig. 3 Layout of monitoring points for ground deformation

## 2 有限元模型

### 2.1 计算模型

采用有限元程序 Plaxis 3D Foundation 来模拟整个气压沉箱施工全过程.根据基坑及沉井工程中土体开挖对周围地层的影响范围,确定其分析域为平面尺寸 150 m×150 m,深 60 m 的三维区域,包括沉箱结构和周边地层.土体采用 15 节点楔形单元模拟,由平面网格中六节点三角形单元生成.沉箱侧壁与隔墙采用八节点四边形板单元,工作室顶板采用六节点板单元.沉箱结构和土体的相互作用采用 12 节点或 16 节点的界面单元模拟.计算模型网格及界面单元如图 4 所示.为便于与现场实测数据比较,在

监测点位置处布置了节点.



a 计算模型网格

b 界面单元

图 4 计算模型网格及界面单元

Fig. 4 The 3D calculation model and its interface elements

数值模拟过程中,首先进行初始地应力计算,然后根据施工计划把整个沉箱下沉过程分为四个施工步,在各施工步中被开挖的土体单元被“杀死”,即给其单元刚度指定一个接近零的值,并激活相关的结构及界面单元.由于沉箱工作室高气压的平衡作用,可认为开挖面孔隙水压基本不变,开挖后基坑内外水头差为零,地下水的渗流可忽略不计,因此计算中设定开挖区域地下水位不变,也无需在开挖面上施加气压荷载.

### 2.2 考虑土体扰动的模型参数及取值

气压沉箱施工时在沉箱底部工作室挖排土,随着开挖的进行,刃脚地基单侧卸荷,受力面积减小,从而发生压缩变形或失稳,沉箱不断下沉直至预定深度.在施工下沉阶段,沉箱结构竖向受力如图 5 所示.

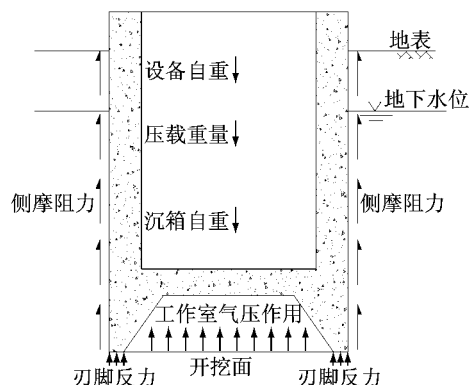


图 5 气压沉箱下沉竖向受力分析

Fig. 5 Vertical forces on pneumatic caissons in sinking

基于对气压沉箱施工原理及工艺的分析,气压沉箱下沉对土体的扰动主要来自于四方面,即开挖卸荷、刃脚挤土、沉箱-土侧摩擦作用及沉箱倾斜、纠偏。在理想施工状态下通过开挖面泄漏的压缩空气极少,因此未考虑高压气体的渗透扰动。为简化分析,计算模型未考虑沉箱的倾斜,即不对沉箱结构施加附加的水平位移。

#### (1) 考虑卸载扰动

气压沉箱施工中需要不断地开挖土体并排到地面,由于上方土体开挖卸荷,根据有效应力原理,沉箱底部土体会进行竖向有效应力释放。土体本构模型选用 Hardening-Soil(H-S)弹塑性模型,以反映初次加载和卸载-再加载之间的刚度差别。与理想弹塑性模型不同,H-S模型的屈服面在主应力空间中不是固定的,而是随着塑性应变的产生不断扩展<sup>[8]</sup>。H-S模型的理论基础是三轴加载下竖向应变  $\epsilon_1$  和偏应力  $q$  之间的双曲线关系(见图6)。

主加载下,与围压相关的刚度模量

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (1)$$

式中:  $E_{50}^{\text{ref}}$  为参考刚度模量(与参考围压  $p^{\text{ref}}$  相对应,Plaxis 中缺省设置  $p^{\text{ref}} = 100$  应力单位),  $E_{50}$  依赖于三轴试验中的围压  $\sigma'_3$ , 应力相关程度由幂  $m$  而定,

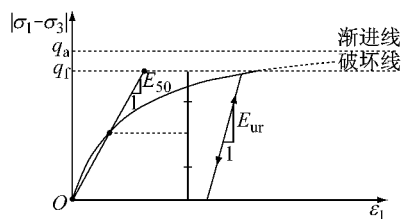


图6 标准排水三轴试验主加载下双曲型应力-应变关系

Fig.6 Hyperbolic stress-strain relation in primary loading for a standard drained triaxial test

此处  $\sigma'_3$  对于压缩而言是负的。卸载和再加载的应力路径用到了另外一个应力相关的刚度模量

$$E_{ur} = E_{ur}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (2)$$

式中:  $E_{ur}^{\text{ref}}$  是卸载和再加载的参考模量(与参考围压  $p^{\text{ref}}$  相对应)。根据王卫东等<sup>[9]</sup>的研究,上海软土地区基坑开挖的数值模拟中,将  $E_{ur}^{\text{ref}}$  设置成  $4E_{50}^{\text{ref}}$  是比较合理的。

根据现场测试和室内试验,本数值分析所采用的排水条件下土体输入参数取值如表2所示,表中黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  均为有效强度参数,  $\nu_{ur}$  为卸载-再加载泊松比,实际值在 0.2 左右。冲填土层主要由黏质粉土组成,因此表中黏质粉土层厚度包含了填土层。

表2 有限元分析中土体参数取值

Tab.2 Soil parameters used in the FEM analysis

土层	层厚/m	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$\nu_{ur}$	$\Psi/(\circ)$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{ur}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$m$
② <sub>3</sub> 黏质粉土	12.0	9	25.0	0.2	0	17.94	71.76	100.0	0.8
④ 淤泥质黏土	6.0	14	10.0	0.2	0	6.03	24.12	100.0	1.0
⑤ <sub>1</sub> 砂质粉土	10.5	6	30.0	0.2	0	24.00	96.00	100.0	0.8
⑤ <sub>2</sub> 粉质黏土	未钻穿	19	18.0	0.2	0	10.32	41.25	100.0	1.0

注:  $\Psi$  为剪胀角。

#### (2) 考虑刃脚挤压扰动

气压沉箱的下沉最终是通过刃脚挤压土体来实现的,在沉箱自重及其他压载作用下,刃脚踏面对土体施加一个竖向分布荷载(从结构上考虑,可以认为刃脚是刚性基础),由于土与刃脚踏面间摩擦力对基底土粒侧向位移的约束作用,在刃脚下形成一个楔形的弹性压密区。刃脚压力以一定的扩散角向下方土体传递,随着沉箱的下沉,将在沉箱周边形成一个环状的“压密圈”。

考虑刃脚挤压的气压沉箱施工计算模型如图7所示。刃脚挤压作用下,土体孔隙比减小,密实度增高,变形模量增大。由于环状土体结构的自身稳定作用,对施工环境控制形成有利扰动。扰动土体参数涉及强度参数及刚度参数两方面,根据施工扰动对土体力学参数影响的分析可知,扰动土体有效应力强

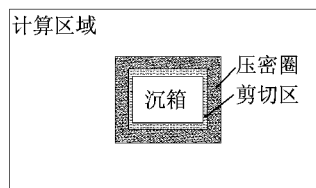


图7 考虑刃脚挤压扰动的计算模型平面示意图

Fig.7 Plan view of the disturbed soils (caused by caisson cutting edge)

度参数基本不变,故分步施工模拟中通过提高土体刚度来进行“压密圈”的模拟。基于陈波<sup>[10]</sup>对上海软土的压缩、剪切试验结果,“压密圈”土体弹性模量及回弹模量在原基础上增加 30%。假定刃脚挤压的有效影响深度为土体附加应力等于刃脚压力 20% 的位置处,作为刃脚挤密作用的有效范围边界。因此,“压密圈”紧贴剪切扰动区外侧,宽度可取为 2 倍刃脚踏

面宽度(2.4 m),高度大致等于沉箱下沉深度,随各施工步中的沉箱下沉深度而更新。

(3) 沉箱-土侧摩擦作用

沉箱下沉时侧壁与周边土体的剪切作用,对土体产生严重扰动,接触面土体结构性丧失,成为重塑土。Plaxis 3D Foundation 采用界面单元来模拟结构与土体的相互作用,通过选择一个合适的强度折减因子  $R_{int}$ ,将界面强度与土体强度相关联,存在如下关系式:

$$\begin{cases} c_i = R_{int} c_s \\ \tan \varphi_i = R_{int} \tan \varphi_s \leq \tan \varphi_s \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varphi_i$  和  $c_i$  分别是界面的内摩擦角和黏聚力,  $\varphi_s$  和  $c_s$  分别是土的内摩擦角和黏聚力。

通常情况下,界面的强度和刚度均小于所处的土层,即  $R_{int}$  小于 1。考虑到目前尚无上海软土-结构接触面性状的相关试验研究成果,本分析假定  $R_{int} = 0.75$ 。

沉箱结构采用线弹性材料模拟,其参数如表 3 所示。

表 3 沉箱结构参数

Tab.3 Parameters of the caisson structure

材料模型	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比
线弹性	25	$3.000 \times 10^7$	0.15

3 有限元计算结果分析

基于三维数值计算结果,分别选取横断面与纵

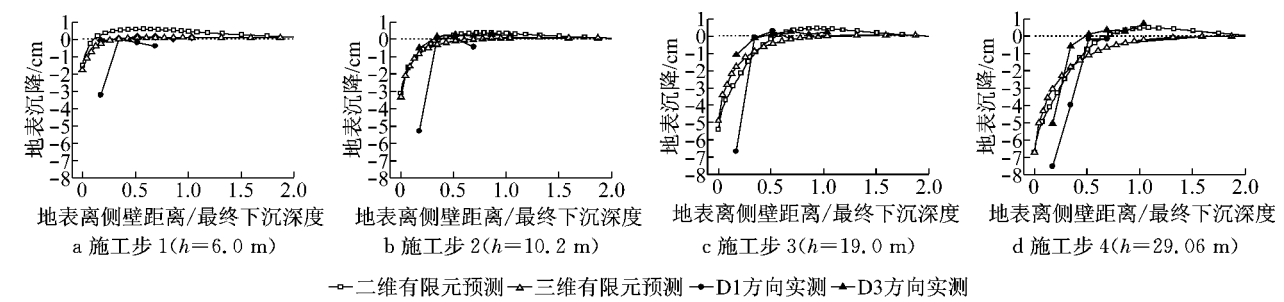


图 8 沉箱纵向地表沉降的有限元解析与实测结果比较

Fig.8 Comparison of the FEM results and the measured surface settlement in the longitudinal direction

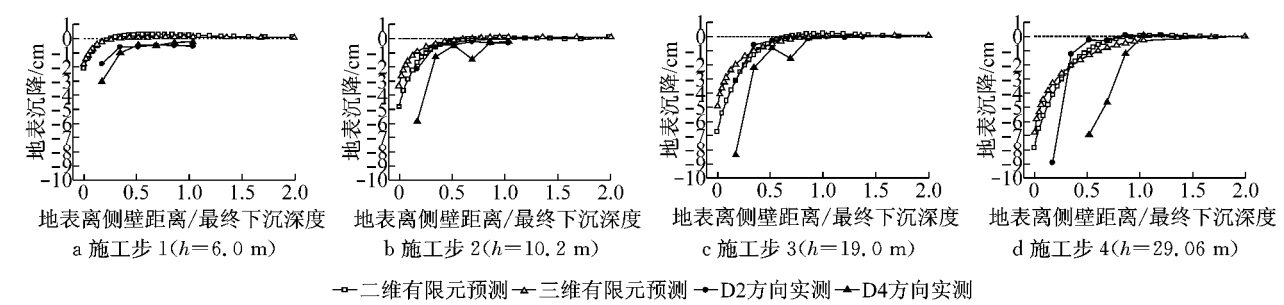


图 9 沉箱横向地表沉降的有限元解析与实测结果比较

Fig.9 Comparison of the FEM results and the measured surface settlement in the transverse direction

断面(即图 3 中 D2 和 D4 方向与 D1 和 D3 方向)对气压沉箱施工过程中的周边地层变形数据进行整理,从沉箱周边地表沉降及土体水平位移两方面选取部分监测点对有限元计算结果和现场实测值进行对比分析,探讨气压沉箱周边地层变形规律。同时,也与以往研究得到的二维数值模拟结果<sup>[7]</sup>进行比较分析。

3.1 地表沉降

图 8 和 9 所示分别为 D1 和 D3 方向与 D2 和 D4 方向在各施工步后地表沉降的三维、二维计算值与实测值。为方便比较,对图中横坐标进行了量纲一处理,取地表离侧壁距离与沉箱最终下沉深度之比。

从图中可看出,三维有限元数值计算得到的沉箱周边地表沉降曲线呈抛物线形,随着离沉箱侧壁距离的增大,地表沉降急剧减小,沉箱边缘处地表沉降最大。三维有限元计算结果与现场实测值基本吻合,很好地表现了气压沉箱施工过程中地表沉降的一般规律。各监测断面地表沉降曲线随沉箱下沉不断下移,沉箱边缘处最大沉降值越来越大,沉降影响范围也逐渐扩大。计算值和实测值显示,沉箱纵断面 D1 和 D3 方向在距离沉箱中心 0.5~1.0 倍下沉深度范围内地表有略微的隆起,但在沉箱横断面 D2 和 D4 方向上几乎没有,说明气压沉箱施工中三维空间效应的存在,在气压沉箱对周边地层的拖曳作用下横断面方向的地表沉降稍大于纵断面方向。

图8和9中三维模拟结果与二维结果基本一致,三维模拟由于考虑了空间效应及土体扰动,地表沉降曲线稍微缓和一些,地表隆起不是很明显,沉箱边缘处最大地表沉降稍微小一些,计算值与实际监测结果更加接近。二维计算中D2和D4方向地表沉降曲线与三维模拟结果更为接近,说明在矩形沉箱施工二维模拟中采用横断面作为平面应变计算模型是合理、偏于安全的,而纵断面计算结果与实际监测数据存在较大差异。

### 3.2 土体水平位移

图10和11所示为T1和T2监测点在各工况下

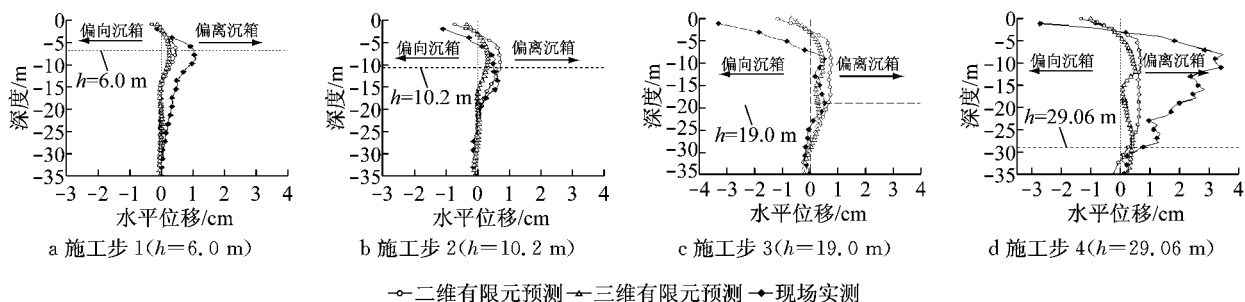


图10 T1监测点各工况水平位移的有限元解析与实测结果比较

Fig.10 Comparison of the FEM results and the measured horizontal movements of T1

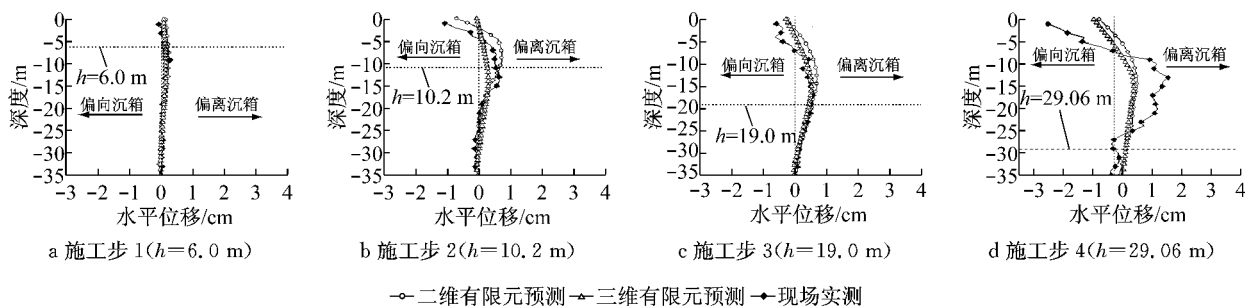


图11 T2监测点各工况水平位移的有限元解析与实测结果比较

Fig.11 Comparison of the FEM results and the measured horizontal movements of T2

随着沉箱下沉,靠近地表一定深度范围的土体偏向沉箱移动,且在地表处达到最大,而该范围以下的土体位移偏离沉箱移动,随深度增加不断增大,达到最大值后逐渐减小直到零。分析认为,靠近地表土体由于侧向卸载围压减小,偏向沉箱移动,而深层土体由于土拱效应以及沉箱下沉的挤压作用,偏离沉箱移动。

## 4 扰动参数敏感性分析

### 4.1 刃脚挤压扰动

将不考虑刃脚挤压扰动的工况与考虑刃脚挤压扰动的工况分别进行数值模拟。由图12可知,当考虑刃脚挤压扰动的情况下,“压密圈”可以有效减小

的土体水平位移数值模拟结果与实测值,由于位移规律相似或位移极小,T3~T7监测点土体水平位移在此不再列出。随着沉箱下沉深度的增加,周边土体的水平位移越来越大。数值计算结果与实测值相比,其变形趋势基本一致,但在施工步4中计算值与实测值偏差较大,这是由于气压沉箱第四次下沉一次下沉深度过大,施工管理措施不到位。三维与二维计算结果相比,两者基本吻合,三维计算水平位移略小于二维计算结果,这是因为三维模拟中通过设置“压密圈”考虑了刃脚的挤压扰动,对周边土体位移起到了一定的隔离作用。

周边地表沉降,相比不考虑刃脚挤压扰动的工况,沉箱边缘处最大地表沉降减小13.3%,但地表沉降影响范围基本不变。由图13可知,“压密圈”可有效减小地表附近偏向沉箱的土体水平位移,但对于深层

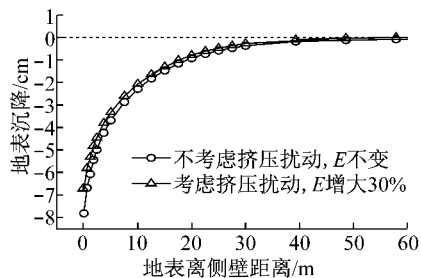


图12 “压密圈”对最终地表沉降的影响

Fig.12 Effects of the compacted zone on the surface settlement

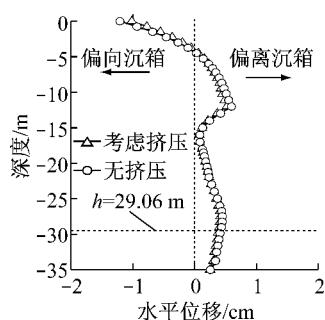


图 13 “压密圈”对土体水平位移的影响(距侧壁 5.0 m 处)  
Fig.13 Effects of the compacted zone on the subsurface horizontal displacement (5.0 m away from the caisson wall)

土体,其影响不大。

#### 4.2 界面强度

本次数值模拟通过改变土体界面强度折减系数来实现对沉箱-土体界面强度的敏感性分析.考虑强度折减系数分别为 0.75 和 1.00 的两种工况,后者相当于不考虑施工对界面土体强度的影响。

计算结果如图 14 和 15 所示.与不考虑界面土体扰动相比,考虑界面土体扰动时沉箱周边地表沉降增大,沉箱边缘处最为显著,最大地表沉降增大 18.2%,但地表沉降影响范围基本不变.对于土体水

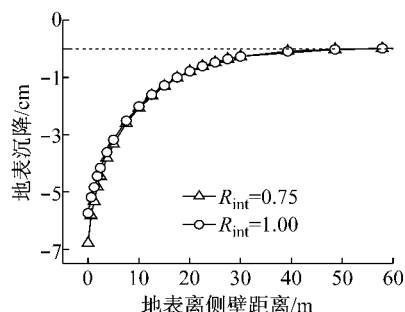


图 14 界面强度对最终地表沉降的影响  
Fig.14 Effects of the interface strength on the surface settlement

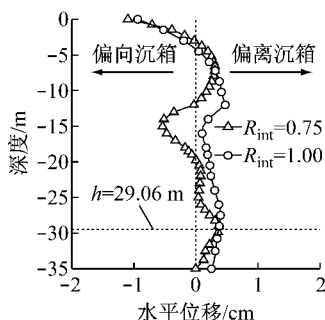


图 15 界面强度对土体水平位移的影响(距侧壁 5.0 m 处)  
Fig.15 Effects of the interface strength on the subsurface horizontal displacement (5.0 m away from the caisson wall)

平位移,在 5.0 m 深度以上,两者位移分布趋势基本相近.不考虑界面土体扰动情况下,在沉箱中部深度处出现偏离沉箱的水平位移,与考虑界面扰动时位移方向相反。

## 5 结论

(1)三维有限元分析可以全面反映气压沉箱施工对周边土体的扰动效应.由于三维有限元分析考虑了气压沉箱施工的空间效应以及土体扰动,与二维计算结果相比,其周边地表沉降和土体水平位移计算值与现场监测结果更加接近,证实了本文提出的计算模型及数值模拟方法的合理性和有效性。

(2)三维计算结果表明,沉箱周边地表沉降曲线呈抛物线形,沉箱侧壁边缘处最大,随着离沉箱距离的增大,沉降量急剧减小.随着沉箱不断下沉,地表沉降逐渐增大,沉降影响范围也随之扩大.总体来说,沉箱周边土体的水平位移较小,其竖向分布形式与沉箱下沉深度、土层分界面等有密切的关系,靠近地表的浅层土体偏向沉箱移动,而深层土体偏离沉箱移动,基本呈中间大、两头小的形态;离沉箱越远,水平位移越小。

(3)考虑刃脚挤压扰动、减小侧壁剪切扰动可以有效减小沉箱边缘最大地表沉降,但对地表沉降影响范围及深层土体水平位移影响不大。

## 参考文献:

- [1] Kodaki K, Nakano M, Maeda S. Development of the automatic system for pneumatic caisson[J]. Automation in Construction, 1997, 6(3): 241.
- [2] 彭芳乐, 孙德新, 大内正敏, 等. 超大深度气压沉箱工法的施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2004, 24(Z1): 699.  
Peng F L, Sun D X, Ohuchi M, et al. Pneumatic caisson construction technology for very deep underground engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2004, 24(Supplement 1): 699.
- [3] 李耀良, 姜春辉, 邓前锋. 全自动、可遥控的现代气压沉箱施工及其关键技术的研究[J]. 建筑施工, 2008, 30(1): 2.  
LI Yaoliang, JIANG Chunhui, DENG Qianfeng. Key construction techniques for modern pneumatic caisson practice with fully automatic and remote control [J]. Building Construction, 2008, 30(1): 2.
- [4] 梅田法義, 藤井直, 井上智裕. ニューマチックケーソン施工過程の数値解析[J]. 応用力学論文集, 2006(9): 603.
- [5] 井上智裕, 藤井直, 大内正敏. ニューマチックケーソン工法によるトンネル施工時の周辺地盤変形解析について[J]. トンネル工学論文集, 2006(16): 155.

(下转第 569 页)