

· 地基与基础 ·



基于ABAQUS的港工结构计算模型 自动地应力平衡方法研究^{*}

贺林林^{1,2,3}, 贾瑞¹, 焦钰祺¹, 梁越^{1,2,3}

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 初始地应力场是结构-地基相互作用下有限元分析重要的初始条件, 其平衡结果的精度将直接影响结构数值分析结果的准确性。虽然自动地应力平衡法操作步骤最为简单、所得结果最优, 但受地基或结构形式、地基土层参数及接触等复杂条件的严重制约, 其在实际中的应用非常受限。利用 ABAQUS 软件, 在严格遵守实际地应力平衡时间节点的基础上, 采用设置生死单元的方式实现初始地应力平衡前、后地基-结构所在空间单元的置换, 建立通用自动地应力平衡方法及步骤, 并通过多个典型港工结构模型算例进行验证。结果表明, 本文的自动地应力平衡方法及步骤简单、易行, 且能够方便有效地实现各种复杂情况下港工结构计算模型的初始地应力平衡。

关键词: ABAQUS; 初始地应力场; 港工结构计算模型; 自动地应力平衡法

中图分类号: U 655.54; TU 431

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0178-08

Research on automatic geo-stress balance method for harbor structure calculation model based on ABAQUS

HE Lin-lin^{1,2,3}, JIA Rui¹, JIAO Yu-qi¹, LIANG Yue^{1,2,3}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The initial geo-stress field is an important initial condition for finite element analysis of structure-soil interaction. The accuracy of initial geo-stress balance results directly affects the accuracy of numerical analysis results of structure. The operation of the automatic geo-stress balance method is the simplest, and the results of it are greatly better than other calculation methods. However, owing to being confined seriously by the foundation and structure type, the soil foundation parameters and contact conditions, the application of it in practice is very limited. We adopt the software of ABAQUS based on following the actual timeline for geo-stress balance in the process of numerical simulation strictly, apply the way of setting life and death elements to implement the replacement of the foundation-structure space element before and after the initial geo-stress balance, establish a general automatic geo-stress balance method and its procedures, and adopt a series of typical complex soil-wharf structure calculation models to verify the proposed method. The results show that the automatic geo-stress balance method and its procedures

收稿日期: 2021-01-08

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600400); 重庆市基础与前沿研究科学基金项目(CSTC2018jcyjAX0559); 重庆交通大学研究生科研创新项目(2020S0028); 中国地质调查项目(DD20189270)

作者简介: 贺林林(1983—), 女, 博士, 副教授, 从事港口海岸及近海工程结构设计理论及方法、土与结构相互作用方向的研究。

established in this paper are easy to implement but with the highest accuracy compared with other methods, and it can conveniently and effectively achieve the initial geo-stress balance for various complex calculation models.

Keywords: ABAQUS; initial geo-stress field; harbor structure calculation model; automatic geo-stress balance method

初始地应力是存在于地壳中未受工程扰动的天然应力, 是引起地下工程变形和破坏的根本作用力^[1]。初始地应力平衡结果的精度将直接影响岩土工程结构数值分析结果的准确性, 但目前缺乏完备的解决初始地应力场问题的理论分析方法及实测技术。而随着计算机技术的不断发展, 通用有限元分析软件 ABAQUS 被广泛应用于解决岩土工程问题, 利用 ABAQUS 进行地应力分析, 能够准确地模拟岩土体的初始应力状态。目前, 地应力平衡常用的方法有自动地应力平衡法、关键字定义初始地应力法和 ODB (open document database, 开放文档数据库) 导入法, 代汝林等^[2]、刘仲秋等^[3]分析这几种地应力平衡方法各自的优缺点; 杨金尤等^[4]对带桩帽复合地基初始地应力平衡方法进行研究。这些研究成果均认为自动地应力平衡法操作步骤最为简单, 且所得结果明显优于其他计算方法。但有些研究^[5-6]认为自动地应力平衡法在地表不平、土体分层不均匀或者有构筑物等复杂情况下不再适用。因此, 自动地应力平衡法受地基或结构复杂形式、地基土层复杂参数、边界条件及接触问题复杂性等条件的严重制约, 使其在实际中的应用非常有限。

鉴于上述问题, 本文通过在数值模拟过程中严格遵守实际需要进行地应力平衡的时间节点, 采用设置生死单元的方式实现初始地应力平衡前、后地基-结构所在空间单元置换, 建立通用自动地应力平衡方法及步骤, 并通过多个算例验证该方法的正确性与优越性。

1 简单模型初始地应力平衡分析

为了进行对比分析, 首先采用代汝林的简单模型进行土体初始地应力平衡分析, 其基本尺寸为 50 m×50 m×30 m (长×宽×高), 计算中采用基

于 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性本构模型, 模型底部采用全自由度约束, x 方向位移 U_1 固定, y 方向位移 U_2 固定, 模型中的岩土材料参数见表 1。分别采用 3 种地应力平衡方法进行计算和对比分析, 各方法所得的地应力平衡结果见表 2。

表 1 岩土材料参数

材料	密度 $\rho/(t \cdot m^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
粉质黏土	20	18	0.35	32	14

表 2 简单土体各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值

计算方法	应力 σ 最大值/MPa	z 向位移 U_3 最大值/ $10^{-16} m$	是否达到平衡要求
自动地应力平衡法	0.254	23.72	是
关键字定义初始地应力法	0.254	0.18	是
ODB 导入法	0.254	7.40	是

由表 2 可知, 对于简单地基模型, 这 3 种方法的计算结果相差不大, 均可达到平衡要求。但关键字定义初始地应力法需要计算模型顶部及底部的应力值与坐标, ODB 导入法须连续导入 ODB 文件直到结果达到要求为止, 操作步骤复杂, 而自动地应力平衡法操作最为简便。

2 复杂模型初始地应力平衡方法及步骤

针对已有研究提出的自动地应力平衡法对地表不平、土体分层不均匀或者既有复杂构筑物等情况不再适用的结论, 本文通过在数值模拟过程中严格遵守实际需要进行地应力平衡的时间节点, 采用设置生死单元的方式实现初始地应力平衡前、后地基-结构所在空间单元置换, 建立通用自动地应力平衡方法及步骤。首先将地应力平衡过程分为地应力平衡分析步和静力分析步两步进行, 将桩基等复杂结构所处空间位置建立成地基土体和桩基结构两种物质单元。在地应力平衡分析步中,

将桩基及上部结构单元杀死，仅对完整的地基土体模型进行地应力平衡分析；在静力分析步中，将桩基及上部结构单元进行激活，并杀死该空间内地基土体单元，以实现采用桩基及上部结构单元替代地基土体单元的目的。此方法的实施与实际工程建设进程相吻合，能更好地模拟地基土体的初始应力状态，具体步骤为：

- 1) 部件的创建及装配。首先创建完整独立的地基土体单元与桩基及上部结构单元，并将桩基及上部结构所在空间位置的土体建立成一个单元集合；然后分别赋予地基土体、桩基及上部结构单元各自的材料属性；最后将桩基及上部结构单元与地基土体模型进行相应位置的装配组合。

- 2) 设置分析步。建立两个分析步，一个分析步为“geostatic”，且将其中的“incrementation”类型设置为“automatic”；另一个分析步为“static, general”。

- 3) 建立地基-结构所在空间单元的置换。首先，在“geostatic”分析步中，采用“model change”将桩基及上部结构单元杀死，使得地应力平衡分析是在完整的地基模型中进行的。然后，在“static, general”分析步中将桩基及上部结构单元激活，同时激活结构与土体之间的接触，并杀死相应地基土体单元，以实现采用桩基及上部结构单元替代地基土体单元的目的，形成完整的地基-上部结构模型以开展后续研究。

3 工程实例验证

在岩土工程有限元计算中，常需要解决复杂地基土体下的地应力平衡问题，如考虑桩土相互作用下的结构稳定性分析问题、隧道开挖问题以及考虑挡土桩的基坑开挖问题等。这些问题中包含了地基或结构的复杂形式、地基土层的复杂参数、边界条件及接触的复杂性。因此本文采用第2节中所提出的方法对不同的地基土层参数、不同地基形式以及不同结构形式下的初始地应力平衡问题进行模拟研究，以验证本文所提方法的

通用性、准确性和优越性。

3.1 不同地基参数

3.1.1 均质土体中的地应力平衡分析

由于地基土体分层不均匀可能导致地应力平衡效果不同，或不适用于地应力平衡方法。因此，本文首先对均质土体和非均质分层土体分别进行模拟分析。

本文均质土体地应力平衡采用贺林林^[7]建立的离岸深水全直桩码头模型，其上部结构(包括面板、纵梁、横梁和桩帽)采用混凝土，面板尺寸42.4 m×15 m×0.5 m(长×宽×高，下同)，横梁尺寸42.4 m×1.2 m×1.5 m，纵梁尺寸15 m×1.5 m×1.5 m，桩帽尺寸3 m×3 m×0.8 m；桩体采用Q345钢管桩，桩身外径取1.8 m，壁厚0.22 m，桩自由长度35 m，入土深度45 m；为了消除边界效应，土体尺寸取180 m×15 m×90 m，土层为非常密实粉砂。模型中的码头上部结构采用弹性本构模型，桩基采用弹塑性本构模型，地基土体采用基于Mohr-Coulomb屈服准则的本构模型，材料参数见表3，有限元计算模型如图1所示。

表3 均质土体模型的材料参数

材料类别	密度 $\rho/(t\cdot m^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
桩	0.88	29.36	0.30	-	-
上部结构	2.50	350	0.20	-	-
非常密实粉砂	2.05	0.016	0.28	5	36

注：桩密度为质量和抗弯等效后的结果。

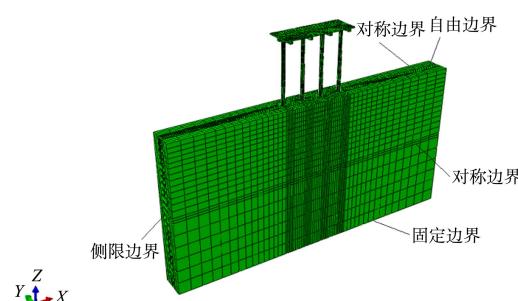


图1 均质土体有限元计算模型

为了进行对比分析，分别采用3种方法进行地应力平衡，各方法所得的地应力平衡结果见图2~4和表4。

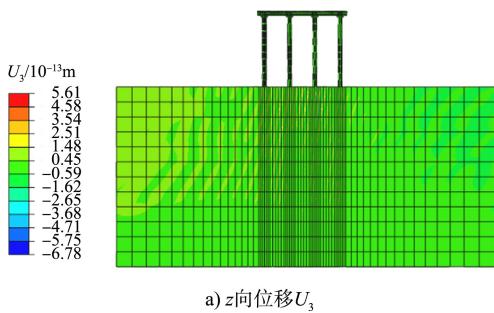
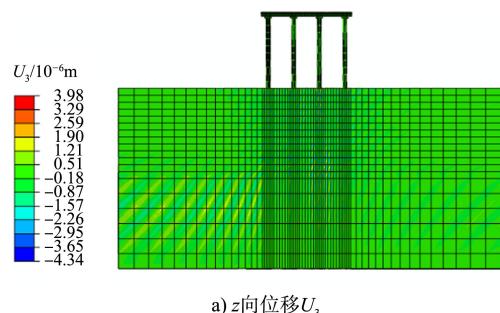
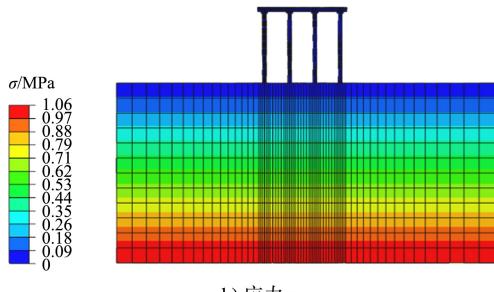
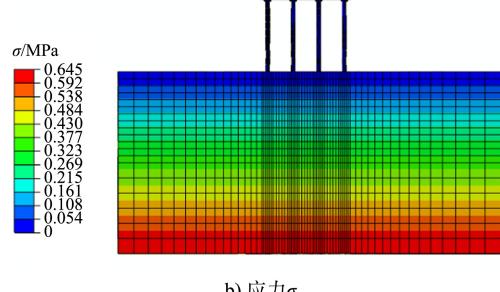
a) z 向位移 U_3 a) z 向位移 U_3 b) 应力 σ b) 应力 σ

图 2 均质土体自动地应力平衡法计算结果

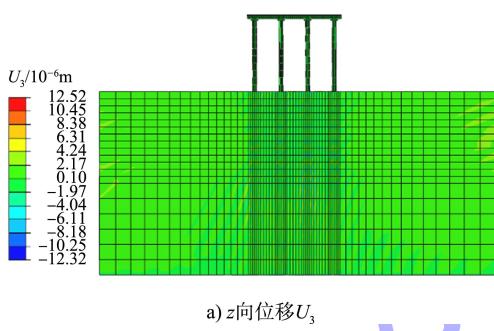
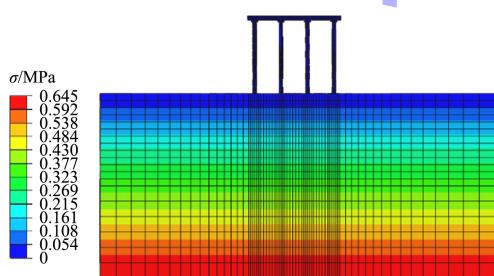
a) z 向位移 U_3 b) 应力 σ

图 3 均质土体关键字定义初始地应力法计算结果

表 4 均质土体各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值

计算方法	σ 最大值/MPa	U_3 最大值/m	平衡效果
自动地应力平衡法	1.059	5.607×10^{-13}	最佳
关键字定义初始地应力法	0.645	1.252×10^{-5}	较差
ODB 导入法	0.645	3.978×10^{-6}	较差

由计算结果可知, 这 3 种方法的结果均已达到地应力平衡的要求, 但自动地应力平衡法操作最为简便, 且平衡后地基中的位移值最小, 即平衡效果最佳。因此, 对于均质地基土体-结构模型, 建议采用自动地应力平衡法, 更为简单方便、节省时间, 且计算结果最佳。

3.1.2 非均质地基土体中的地应力平衡分析

对于非均质地基土体-结构模型的研究, 采用 3.1.1 节模型, 上部结构和桩基仍采用上述模型材料, 将地基土由上至下分为非常软的砂质黏土、中等密实粉砂、非常密实粉砂、硬黏土和非常密实粉砂, 材料参数见表 5。

表 5 非均质地基土体材料参数

材料类别	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	底层埋深 h/m
非常软的砂质黏土	1.79	4.07	0.35	16.3	15	13.5
中等密实粉砂	1.93	9.50	0.31	3.0	34	27.0
非常密实粉砂	2.05	16.00	0.28	5.0	36	34.0
硬黏土	1.90	18.00	0.25	30.0	18	42.0
非常密实粉砂	2.05	16.00	0.28	5.0	36	90.0

分别采用 3 种方法进行地应力平衡, 各方法所得的地应力平衡结果见图 5~7 和表 6。

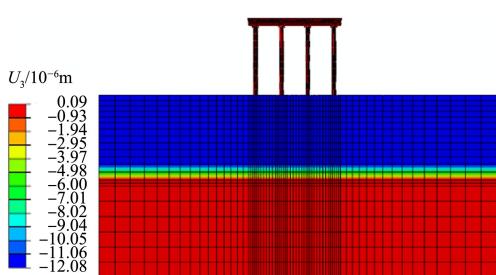
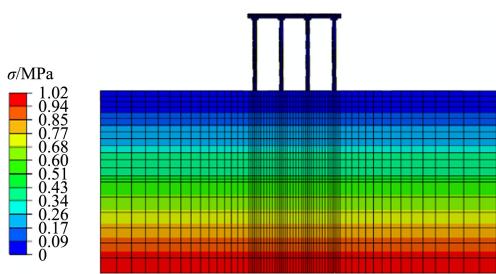
a) z 向位移 U_z b) 应力 σ

图 5 非均质土体自动地应力平衡法计算结果

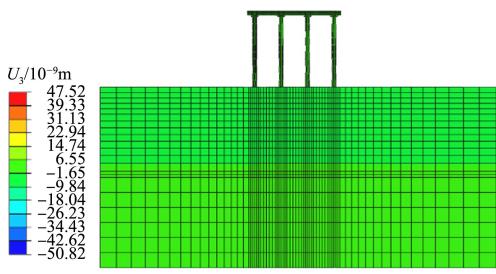
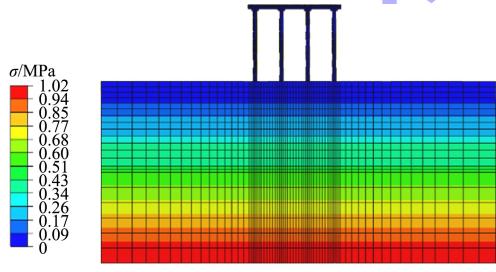
a) z 向位移 U_z b) 应力 σ

图 6 非均质土体关键字定义初始地应力法计算结果

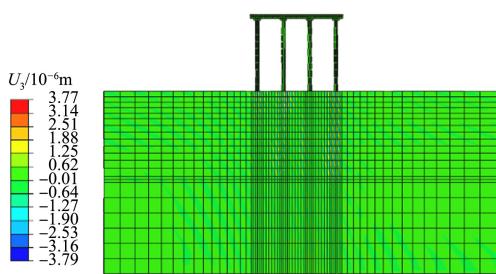
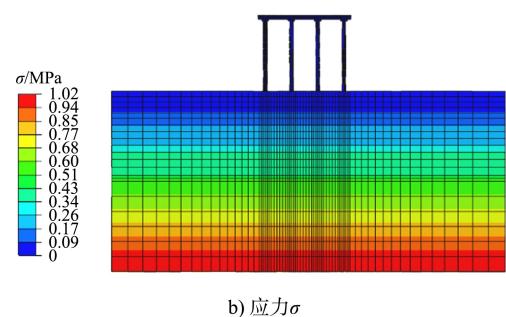
a) z 向位移 U_z b) 应力 σ

图 7 非均质土体 ODB 导入法计算结果

表 6 非均质土层各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值

计算方法	σ 最大值/ MPa	U_z 最大值/ 10^{-6} m	平衡效果
自动地应力平衡法	1.021	0.088	最佳
关键字定义初始地应力法	1.021	0.048	最佳
ODB 导入法	1.021	3.772	较差

由计算结果可知, 这 3 种方法的结果均已达到地应力平衡的要求, 且自动地应力平衡法和关键字定义初始地应力法的平衡效果最佳, 但关键字定义初始地应力法需要计算各层土体及上部结构最高点及最低点的应力和位移值, 然后通过施加预应力场的方式进行计算, 过程较复杂; ODB 导入法须连续导入 3 次 ODB 文件才达到 10^{-6} m 量级; 而自动地应力平衡法在最初建立好计算模型后, 只需要进行简单的操作便可进行相应的分析, 且计算结果最佳。因此, 对于非均质地基土体, 建议采用自动地应力平衡法。此外, 对比均质土体与非均质土体地应力平衡计算结果发现, 均质地基土体的平衡效果要优于非均质地基土体, 由此可得地应力平衡与地基土体分层有关, 土层越均匀, 其平衡效果越好。

3.2 不同地基形式

由于在实际工程中并非所有的地基都是水平的, 有些地基是相对复杂的倾斜表面, 而倾斜地基也将增加计算的复杂性。本节对表面倾斜的地基进行初始地应力平衡分析。

本节采用许津玲^[8]建立的架空直立式框架码头模型, 岸坡总长度为 125 m, 高度为 58 m, 宽度为 42 m, 坡度为 1:3。码头上部由混凝土结构部件组成, 主要由横梁、纵梁、面板、横撑、纵撑

等组成。码头前后桩基的间距为 8 m, 首尾桩中心距 35 m, 下部桩基直径为 2.4 m 的 C30 钢筋混凝土桩基, 上部结构立柱直径为 1.6 m, 码头排架间距为 8 m。模型中的桩基及上部结构均采用弹性本构模型, 地基土体采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性本构模型, 材料参数见表 7, 有限元计算模型如图 8 所示。

表 7 倾斜复杂地基材料参数

材料类别	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
高填方土体	1.87	10	0.23	27.04	34.5
上部结构和桩基	2.50	30 000	0.25	-	-

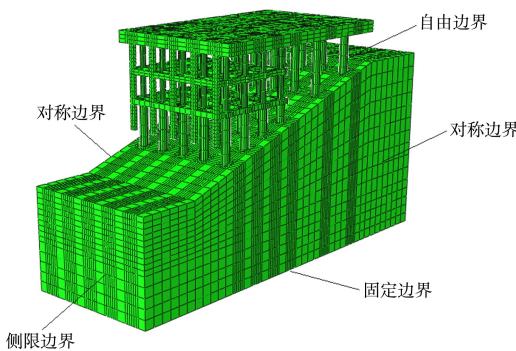


图 8 倾斜复杂地基有限元模型

由于该模型中岸坡土体的坡度为 1:3, 关键字定义初始地应力法由于无法准确计算出其最高点及最低点的应力值及分布情况而不再适用。因此, 本节仅采用自动地应力平衡法和 ODB 导入法进行分析, 限于篇幅, 仅列出各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值, 见表 8。

表 8 倾斜复杂地基各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值

计算方法	σ 最大值/ kPa	U_3 最大值/ $10^{-6} m$	平衡效果
自动地应力平衡法	0.707 2	3.211	最佳
ODB 导入法	0.707 2	16.810	较差

由表 8 可知, 对于倾斜地基采用自动地应力平衡法和 ODB 导入法进行地应力平衡均可达到平衡要求, 但 ODB 导入法操作过程较复杂, 且计算过程中极易出错, 而一次操作失误便需要重新进行计算。因此, 倾斜地基的地应力平衡建议采用自动地应力平衡法。

3.3 不同结构形式

3.3.1 沉入式大圆筒码头结构的地应力平衡分析

本节采用蔡雅慧^[9]建立的沉入式大圆筒码头结构形式进行模拟计算, 圆筒为钢质材料, 直径 26 m, 壁厚 20 mm, 筒高 54.5 m, 大圆筒内填土分别为回填中粗砂、淤泥、粉细砂、粉质黏土②、粉土③、粉质黏土⑤和粉土⑥, 材料参数见表 9。圆筒结构顶高程设为 4.50 m, 港区原泥面高程为 -10.00 m, 码头前沿开挖至 -19.50 m。为了消除边界效应的影响, 模型总长度为 286 m, 宽度为 28 m, 码头前沿高度为 122 m, 码头后方平台高度为 146 m。模型左右两侧为侧限边界, 前后两侧为对称边界, 底面为固定边界, 顶面为自由边界。有限元计算模型如图 9 所示。分别采用 3 种方法进行地应力平衡, 限于篇幅, 仅列出各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值, 见表 10。

表 9 沉入式大圆筒码头材料参数

材料类别	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	厚度 H/m
回填中粗砂	1.80	15.00	0.20	0	32.0	14.5
淤泥	1.75	1.93	0.35	6.0	14.0	3.6
粉细砂	1.80	9.00	0.25	0	25.0	4.4
粉质黏土②	1.90	4.87	0.35	16.1	20.8	10.0
粉土③	2.05	10.96	0.25	29.3	26.6	9.4
粉质黏土⑤	2.07	8.21	0.35	34.2	23.4	18.1
粉土⑥	2.01	10.23	0.25	24.8	27.9	86.0
钢质圆筒	7.85	2.10×10^5	0.30	-	-	-

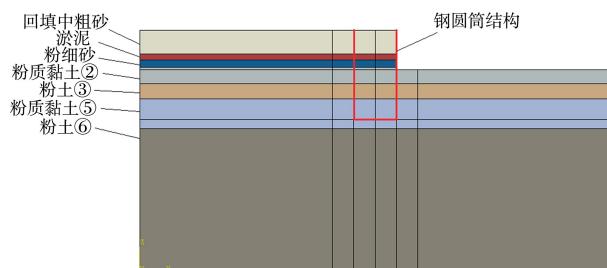


图 9 沉入式大圆筒码头有限元计算模型

表 10 沉入式大圆筒码头结构各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值

计算方法	σ 最大值/ MPa	U_3 的最大值/ m	平衡效果
自动地应力平衡法	1.832	1.916×10^{-6}	最佳
关键字定义初始地应力法	4.189	1.343×10^{-1}	最差
ODB 导入法	1.832	6.235×10^{-4}	较差

由于大圆筒码头结构地基土体不是完全水平的，呈阶梯分布，具有一定的高度差。因此，在采用关键字定义初始地应力法进行平衡时需要分别计算两侧对应最高点与最低点的应力值，而由于左侧与右侧有高度差，其应力值差异也较大，使得应力等值线发生了偏移，且由于左侧土体整体刚度较大，在重力作用下左右两侧产生的位移不均衡，导致其平衡效果较差，位移仅能达到 10^{-1} m 量级，未能满足地应力平衡的要求。此外，ODB 导入法需要连续导入 10 次 ODB 文件位移才能达到 10^{-4} m 量级，操作过程较为复杂，而自动地应力平衡法的平衡效果要明显优于其他方法，值得推荐。

3.3.2 沉箱码头结构的地应力平衡分析

本节采用孙英皓^[10]建立的沉箱码头结构形式进行模拟计算，沉箱采用钢筋混凝土结构，尺寸为 20.0 m×20.0 m×17.9 m(长×宽×高)，前后趾宽 1.5 m，箱内及墙后均为回填砂土，码头基础为 10~100 kg 抛石基床，基床开挖坡度为 1:2，基础底宽 44 m、顶宽 92 m、厚 12 m，地基土体为砂土，其材料参数见表 11。为了消除边界效应的影响，模型总长度为 600 m、宽度为 20 m、高度为 200 m。模型左右两侧为侧限边界，前后两侧为对称边界，底面为固定边界，顶面为自由边界。有限元计算模型见图 10。分别采用 3 种方法进行地

应力平衡，仅列出各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值，见表 12。

表 11 沉箱码头结构材料参数

材料类别	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$
地基砂土	1.95	151	0.30	5.0	32
回填砂土	1.60	79	0.30	7.0	36
块石	1.80	99	0.30	1.5	45
钢筋混凝土	2.50	30 000	0.25	-	-

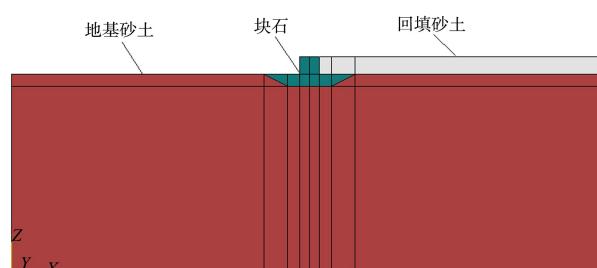


图 10 沉箱码头有限元计算模型

表 12 沉箱码头结构各种方法平衡地应力时的应力和位移代表值

计算方法	σ 最大值/ MPa	U_3 最大值/ m	平衡效果
自动地应力平衡法	2.102	3.534×10^{-15}	最佳
关键字定义初始地应力法	2.102	9.600×10^{-6}	较差
ODB 导入法	2.102	2.192×10^{-6}	较差

由计算结果可知，虽然 3 种地应力平衡方法的平衡结果位移值均达到了 10^{-6} m 量级或更小，均能够满足地应力平衡的要求，但显然自动地应力平衡法的平衡效果要优于其他两种方法，平衡效果最佳。因此，进一步表明本文提出的通用自动地应力平衡方法的优越性，值得在复杂地基-结构模型计算中推广应用。

4 结论

1) 本文提出通过在数值模拟过程中严格遵守实际进行地应力平衡的时间节点，采用设置生死单元的方式实现初始地应力平衡前、后地基-结构所在空间单元置换，建立通用自动地应力平衡方法及步骤。

2) 经工程实例验证，本文提出的通用自动地应力平衡方法是可行的，能够实现各种复杂情况下岩土工程结构初始地应力平衡，且与其他方法

相比, 其操作更简便、计算精度更高, 具有明显的优越性。

3) 通过几种复杂计算模型的对比分析发现, 本文提出的自动地应力平衡方法的平衡效果与土体分层有关, 土体越均匀其平衡效果越好, 而不受地基与结构形式复杂性的限制, 能够方便有效地完成各类复杂计算模型的地应力平衡。

4) 本文的研究成果可促进自动地应力平衡法在复杂计算模型中的推广应用, 体现了 ABAQUS 软件自带功能的便利与强大, 值得深入研究, 也为复杂岩土工程结构有限元分析及相关研究提供参考和借鉴。

5) 由于本文基于 ABAQUS 所建立的通用自动地应力平衡法是采用密度和泊松比进行平衡的, 不能反映地基的水平土压力系数 K_0 和地基超固结等因素的影响, 当考虑地基水平土压力系数和土体超固结的影响时仍须采用关键字定义初始应力法进行地应力平衡。

参考文献:

[1] 蔡美峰.地应力测量原理和技术(修订版)[M].北京:科

(上接第 97 页)

6 导标

第 1 段航道长度较短, 且通视区内高大厂房较多, 不布置导标, 其他 3 段均布置导标。

导标均可布置在陆地上, 但导标通视区内有山地, 且现场施工、运输和电力供应条件较差。后续导标布置专题研究时应结合港区总体规划、自然条件和造价等进行综合比较。

7 结论

1) 对于航道轴线选择, 通过对通航条件、与潮流适应性、泥沙运动及回淤、工程量、投资概算和未来扩建适应性等多个方面进行比选, 方案 2 优于方案 1。

2) 充分考虑地形对波浪的影响, 分内、外航道分别计算航道尺度, 并考虑波浪沿航道轴线衰减因素, 有利于降低疏浚量, 节省工程投资。

学出版社, 1995.

- [2] 代汝林, 李忠芳, 王姣. 基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(9): 76-81.
- [3] 刘仲秋, 章青, 束加庆. ABAQUS 软件在岩体力学参数和初始地应力场反演中的应用[J]. 水力发电, 2008(6): 35-37, 104.
- [4] 杨金尤, 雷金波, 邹永强, 等. 基于 ABAQUS 的带帽桩复合地基初始地应力平衡方法浅析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2017, 31(4): 73-78.
- [5] 李思维, 赵一帆. 浅基础与桩基础地层结构效应中地应力平衡计算[J]. 港工技术, 2020, 57(S1): 58-62.
- [6] 胡长明, 袁一力, 梅源, 等. 基于 ABAQUS 的地层-结构法模型的地应力平衡方法研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 76-86.
- [7] 贺林林. 离岸深水全直桩码头结构承载特性及简化计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [8] 许津玲. 深厚回填土蠕变对架空直立式码头承载性能的影响分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [9] 蔡雅慧. 沉入式大圆筒码头结构稳定性有限元分析方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] 孙英皓. 重力式码头地基基础承载力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.

(本文编辑 王璁)

参考文献:

- [1] 大连市交通运输局. 大连港普湾港区总体规划[R]. 大连: 大连市交通运输局, 2019.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 大连港普湾港区公共航道工程工程可行性研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.
- [3] 交通运输部天津水运科学研究所. 普湾港区公共航道项目波浪数学模型研究院报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运科学研究所, 2016.
- [4] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 普湾港区公共航道项目潮流泥沙数学模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2016.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [6] 大连海事大学. 大连港普湾港区公共航道工程通航安全咨询报告[R]. 大连: 大连海事大学, 2020.

(本文编辑 郭雪珍)