

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1858

沉井下沉过程的运动学特性与下沉控制研究

陈保国¹, 贺洁星¹, 骆瑞萍², 张光辉³, 高琦¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省建筑科学研究设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430071;
3. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 软土地层中沉井下沉影响机制复杂, 现有的理论研究主要基于沉井的受力特性开展下沉分析, 沉井下沉过程中的运动学特性缺乏科学系统的阐释。对沉井下沉运动过程进行分析, 建立沉井下沉力学模型, 推得沉井下沉过程的运动学方程, 揭示了沉井下沉的运动学特性和影响机制。并结合实际工程案例验证了该方法的合理性和正确性。研究结果表明, 沉井下沉具有典型的下沉加速及下沉减速阶段; 沉井下沉施工引起的初始下沉不平衡力 ΔF_1 是影响下沉运动特征的重要因素, 也是下沉运动控制的首要因素; 调整反映土层及沉井结构特征的参数 b_1 是预防沉井突沉的有效手段。

关 键 词: 沉井; 运动特性; 运动方程; 下沉控制

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022) 增刊 2-0425-07

Kinematic characteristics and sinking control of open caisson during sinking process

CHEN Bao-guo¹, HE Jie-xing¹, LUO Rui-ping², ZHANG Guang-hui³, GAO Qi¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Hubei Provincial Academy of Building Research and Design Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: The influence mechanism of open caisson sinking in soft soil stratum is complex. The available theoretical research mainly focused on the mechanical characteristics of open caisson for analyzing the sinking process. The kinematic characteristics of open caisson during sinking process are lack of scientific and systematic interpretation. To this end, this paper establishes the mechanical model of open caisson sinking, deduces the kinematic equation of open caisson, and reveals the kinematic characteristics and the influence mechanism of the open caisson during sinking process. The rationality and correctness of the theoretical method is verified based on a practical project. The research results show that the sinking process of open caisson has obvious acceleration sinking stage and deceleration sinking stage. The initial unbalance force before sinking (ΔF_1) caused by sinking construction of open caisson is an important factor affecting the sinking characteristics, as well as the primary factor for controlling the sinking movement. Adjusting the parameter b_1 , which reflects the characteristics of soil layer and open caisson structure, is an effective method to prevent sudden sinking of open caisson.

Keywords: open caisson; kinematic characteristics; equation of motion; sinking control

1 引 言

沉井以其整体性强、稳定性好、施工操作简单等特点在市政、桥梁等工程中的应用越来越广泛^[1-2]。然而, 软土地层沉井下沉过程中的突沉难以控制, 沉井发生突沉后往往造成工程质量差, 施工周期延长, 周边建构筑物危害等一系列负面影响^[3-5]。

现有研究工作主要是针对沉井下沉过程中的受力特性, 为沉井的下沉施工进行理论指导。陈晓平等^[6]根据现场监测数据, 分析了沉井下沉机制及下沉过程中的受力特性, 给出了沉井侧壁最大摩阻力的计算公式和分布特征; 梁穉稼等^[7]基于极限平衡状态和平面滑裂面假定, 推导出了沉井下沉时的土压力和侧壁摩阻力计算公式; 王健^[8]、蒋炳楠^[9]等

收稿日期: 2021-11-03

修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(No.52178370); 中国电建集团铁路建设有限公司科技项目(No.STT-SJQ-SG0022020-KY-001)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52178370) and the Science and Technology Project Funding of China Power Construction Group Railway Construction Co., Ltd.(STT-SJQ-SG0022020-KY-001).

第一作者简介: 陈保国, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事地下建筑工程方面的教学与科研工作。E-mail: baoguo_chen@126.com

通讯作者: 贺洁星, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事沉井工程方面的科研工作。E-mail: 1641992485@qq.com

通过室内模型试验和现场监测数据,研究了沉井侧壁摩阻力的分布特性;褚晶磊等^[10]通过下沉模拟试验研究了下沉动态过程中侧壁有效应力的分布规律;郭明伟等^[11]结合现场监测数据,分析了沉井下沉过程中端阻力分布特征及变化规律;闫富有等^[12]基于滑移线场理论,建立了考虑刃脚切土深度和考虑刃脚形状的极限土阻力的计算公式;Chavda 等^[13]通过模型试验研究了不同刃脚切削角对沉井下沉阻力的影响,并基于图像变形测量技术分析了刃脚处的土壤流动机制;Peng 等^[14]提出了一种沉井施工对周围地层影响的运动力学模型,通过有限元软件和现场监测数据的对比分析验证了该模型的正确性。这些研究成果很好地阐释了沉井的受力特性,然而关于沉井下沉的运动学特征尚无系统的理论分析。马远刚等^[15]通过对沉井下沉的现场监测数据分析,研究了沉井突沉预警体系指标及其取值范围;蒋炳楠等^[16]通过下次模拟试验发现刃脚踏面应力、斜面应力、刃脚处水力梯度的变化对沉井的突沉预警有重要意义;施州等^[17]通过研究沉井下沉施工中的摩阻力特性,提出瞬时静、动摩阻力变化力差是引起沉井突沉的关键因素;张治成等^[18]结合现场监测数据对沉井下沉受力特性进行分析,通过有限元软件揭示了突沉过程中土体的扰动损失行为。由于现场监测难以得到沉井下沉过程中的运动参数,目前的研究成果未能反映出沉井下沉过程中的运动学特征;实际工程施工过程中,沉井的下沉位移量无法精确预估。

本文通过对沉井下沉运动过程进行分析,建立沉井下沉力学模型,推导沉井下沉运动学方程,从而阐释沉井的下沉运动特性和影响机制,进而提出沉井下沉控制措施,以期对沉井下沉施工提供理论指导。

2 沉井下沉运动过程分析

沉井下沉是一个动态过程,下沉的过程可分为 3 个阶段。首先是从静力平衡转为下沉受力失衡。沉井初始在土层中处于静力平衡状态,采用合适的施工措施,使得沉井的下沉力逐渐增加(压力式沉井)或下沉阻力逐渐减小(取土下沉、空气幕助沉等),沉井侧壁阻力和刃脚端阻力逐渐趋于极限值,沉井受力达到静力平衡的极限状态。如果在此基础上继续施工,沉井在此极限状态下产生了一个初始下沉不平衡力,沉井产生初始下沉加速度。

然后是下沉加速阶段。沉井在初始加速度作用下开始下沉。由于沉井下沉初始位移较小,下沉阻

力的增量也较小,沉井仍具有向下的加速度,且这个加速度会随着下沉位移的增大而逐渐减小,沉井做下沉加速运动。随着下沉位移的增加,下沉阻力也在逐渐增加,直至所增加的下沉阻力与初始下沉不平衡力相等,此时下沉加速度减为零,但其下沉的速度达到最大值,这是下沉加速阶段与下次减速阶段的临界点。

最后为下沉减速阶段。在临界点沉井虽然达到受力平衡状态,但其具有最大下沉动能,沉井仍会继续下沉。随着下沉位移进一步增加,下沉阻力增量已超过初始下沉不平衡力,沉井加速度方向转为向上,这个反向加速度随着下沉位移的增大而增大,沉井开始做下沉减速运动。当下沉速度减小到零时,此时下沉位移达到最大值,下沉停止。

3 沉井下沉运动特性解析

3.1 下沉运动受力模型

由于沉井下沉是由静转动再由动转静的一个过程,下沉过程受力特性复杂。本文基于以下几个假定条件,推导沉井下沉的运动方程。

(1)沉井下沉过程中的侧壁摩阻力为极限阻力,与土层性质相关,随沉井侧壁与土的接触面积线性增加。

(2)沉井下沉时为竖直状态,不考虑由于沉井倾斜而产生的额外受力影响。

沉井下沉时受力状态如图 1 所示。下沉时主要受到结构下沉力 F_i 、浮力 R_w 、侧壁摩阻力 R_f (包括外壁摩阻力以及内壁摩阻力) 以及刃脚端阻力 R_j 等。

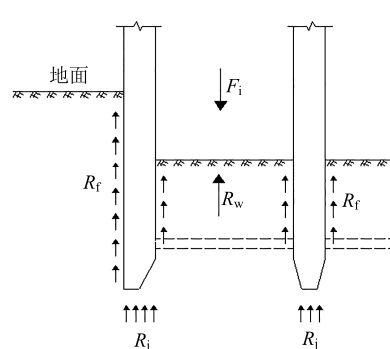


图 1 沉井下沉受力模型图

Fig.1 Sinking force model diagram of a caisson

3.2 下沉运动学方程推导

由下沉位移对时间的二次导数可以得出沉井下沉运动加速度:

$$\frac{D^2x}{Dt^2} = a = \frac{\Delta F_1 - \Delta F_2}{m} \quad (1)$$

式中：\$x\$ 为沉井下沉位移量；\$t\$ 为沉井下沉时间；\$\Delta F_1\$ 为由下沉施工操作产生的初始下沉不平衡力；\$\Delta F_2\$ 为沉井下沉产生的下沉阻力增量；\$m\$ 为沉井重量。

$$\Delta F_1 = F_i - F_j + \Delta F \quad (2)$$

式中：\$F_j\$ 由侧壁摩阻力、刃脚端阻力以及浮力组成；\$\Delta F\$ 为施工造成的下沉力或下沉阻力的改变量。

$$F_j = R_f + R_j + R_w \quad (3)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} R_j &= f_a A \\ R_f &= \sum_{i=1}^n f_{ki} h_{si} c \\ R_w &= \rho g V \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中：\$f_a\$ 为刃脚土体的承载力，考虑地基承载力修正的计算式为 \$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5)\$，\$\gamma_m\$ 为沉井内侧刃脚以上土体的加权平均重度；\$A\$ 为沉井刃脚底部面积；\$f_{ki}\$ 为第 \$i\$ 层土的摩擦力标准值；\$h_{si}\$ 为与沉井侧壁接触的第 \$i\$ 层土厚度；\$c\$ 为沉井周长（沉井内存在土体时，需考虑沉井内周长）；\$V\$ 为沉井进入地下水位以下部分的体积。

沉井下沉过程中阻力增量为

$$\Delta F_2 = \Delta R_j + \Delta R_f + \Delta R_w \quad (5)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_j &= \eta_d \gamma_m A x \\ \Delta R_f &= f_{kn} c x \\ \Delta R_w &= \rho g A_1 x \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中：\$A_1\$ 为地下水位以上沉井横截面面积。

将式（5）代入式（1）中可得

$$\frac{D^2x}{Dt^2} = \frac{\Delta F_1 - (\eta_d \gamma_m A x + f_{kn} c x + \rho g A_1 x)}{m} = a_1 + b_1 x \quad (7)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\Delta F_1}{m} \\ b_1 &= -\frac{\eta_d \gamma_m A + f_{kn} c + \rho g A_1}{m} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

解此微分方程可得

$$\left. \begin{aligned} x &= c_1 \cos(\sqrt{-b_1} t) + c_2 \sin(\sqrt{-b_1} t) - \frac{a_1}{b_1} \\ v &= x' = -c_1 \sqrt{-b_1} \sin(\sqrt{-b_1} t) + c_2 \sqrt{-b_1} \cos(\sqrt{-b_1} t) \\ a &= x'' = c_1 b_1 \cos(\sqrt{-b_1} t) + c_2 b_1 \sin(\sqrt{-b_1} t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将边界条件 \$t = 0\$ 时，\$x = 0\$，\$v = 0\$ 代入式（9）可得

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{a_1}{b_1} \\ c_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

从而求得沉井下沉的运动解析方程式为

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{a_1}{b_1} \cos(\sqrt{-b_1} t) - \frac{a_1}{b_1} \\ v &= -\sqrt{-b_1} \frac{a_1}{b_1} \sin(\sqrt{-b_1} t) \\ a &= a_1 \cos(\sqrt{-b_1} t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3.3 下沉运动过程分析

3.3.1 下沉位移-时间关系

在沉井下沉加速和下沉减速两个阶段，速度从 0 增加到最大值和从最大值减小到 0 这一过程中，由三角函数和式（11）可得沉井单次下沉时间为 \$\frac{\pi}{\sqrt{-b_1}}\$。沉井下沉的位移-时间函数关系如图 2 所示。

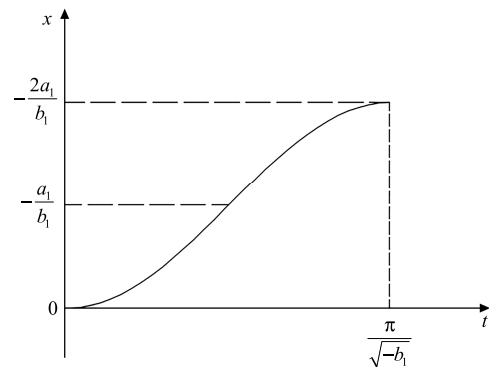


图 2 位移-时间函数图

Fig.2 Displacement-time function graph

由图 2 可知，沉井在初始下沉不平衡力作用下的位移最大值为

$$x_{\max} = -\frac{2a_1}{b_1} = \frac{2\Delta F_1}{\eta_d \gamma_m A + f_{kn} c + \rho g A_1} \quad (12)$$

下沉运动时间为

$$t = \frac{\pi}{\sqrt{-b_1}} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{\eta_d \gamma_m A + f_{kn} c + \rho g A_1}{m}}} \quad (13)$$

由式 (12) 可知沉井下沉最大位移量 x 与初始不平衡力 ΔF_1 、沉井内侧刃脚以上土体加权平均重度 γ_m 、埋深承载力修正系数 η_d 、刃脚底部面积 A 、刃脚土层单位摩阻力 f_{kn} 、沉井周长 c 以及地下水位以上沉井横截面面积 A_1 有关。沉井下沉位移大小随初始不平衡力增大而增大, 随沉井内侧刃脚以上土体平均重度、埋深承载力修正系数、刃脚底部面积、刃脚土层单位摩阻力、沉井外内侧周长、地下水位以上沉井横截面面积的增大而减小。由式 (13) 可知, 沉井下沉的时间与沉井内侧刃脚以上土体加权平均重度 γ_m 、埋深承载力修正系数 η_d 、刃脚底部面积 A 、刃脚土层单位摩阻力 f_{kn} 、沉井周长 c 以及沉井重量 m 有关。沉井下沉时间随沉井内侧刃脚以上土体平均重度、埋深承载力修正系数、刃脚底部面积、刃脚土层单位摩阻力、沉井外内侧周长、地下水位以上沉井横截面面积、沉井重量的增大而增大。

3.3.2 下沉速度-时间关系

由式 (11) 可得沉井下沉的速度-时间函数关系如图 3 所示。

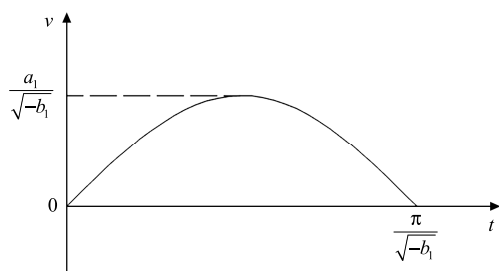


图 3 速度-时间函数图

Fig.3 Speed-time function graph

由图 3 可知, 沉井下沉速度表现为先增加至最大值然后减小至 0 的过程, 速度最大值为

$$v_{\max} = \frac{a_1}{\sqrt{-b_1}} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{m(\eta_d \gamma_m A + f_{kn} c + \rho g A_1)}} \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 沉井的下沉最大速度与 ΔF_1 、 γ_m 、 η_d 、 A 、 f_{kn} 、 c 、 m 以及 A_1 有关。沉井下沉最大速度随初始不平衡力的增大而增大, 随沉井自重、沉井内侧刃脚以上土体平均重度、埋深承载力修正系数、刃脚底部面积、刃脚土层单位摩阻力、沉井外内侧周长、地下水位以上沉井横截面面积的增大而减小。

3.3.3 下沉加速度-时间关系

由式 (11) 可得沉井下沉的加速度-时间函数关系如图 4 所示。

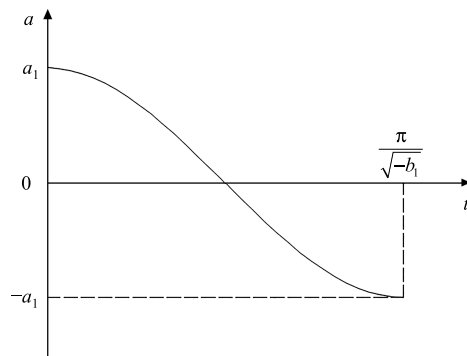


图 4 加速度-时间函数图

Fig.4 Acceleration-time function graph

由图 4 可知, 沉井下沉加速度表现为逐渐减小至 0 再反向增加的过程, 加速度最大值为

$$a_{\max} = a_1 = \frac{\Delta F_1}{m} \quad (15)$$

由式 (15) 可知, 沉井的下沉最大加速度与 ΔF_1 以及 m 有关。沉井下沉最大加速度随初始不平衡力的增大而增大, 随沉井自重的增大而减小。

4 算例验证

以深圳某水质净化厂项目进水泵房沉井工程为例。该场地土层由上往下分别为素填土、淤泥、黏土质粗砂、残积土、全风化混合花岗岩等, 地下水位埋深 1 m。沉井平面尺寸见图 5。沉井采用机械取土下沉, 下沉取土之前在沉井四周堆土, 增加其下沉阻力, 防止沉井突沉。沉井施工过程为 3 次浇筑 2 次下沉, 首节沉井高 13 m。选取计算工况见图 6, 此时沉井已经穿越素填土层, 刃脚与淤泥层接触, 沉井外侧填土高 12 m, 内侧填土高 1 m。根据勘察资料, 堆土、素填土的重度为 16.7 kN/m^3 , 淤泥的重度为 17.1 kN/m^3 , 堆土、素填土与沉井之间的单位摩阻力极限值取 25 kPa , 淤泥与沉井之间的单位

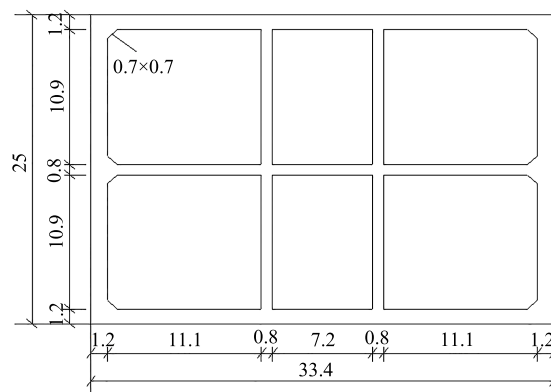


图 5 沉井平面尺寸示意图 (单位: m)

Fig.5 Schematic diagram of the size of the caisson (unit: m)

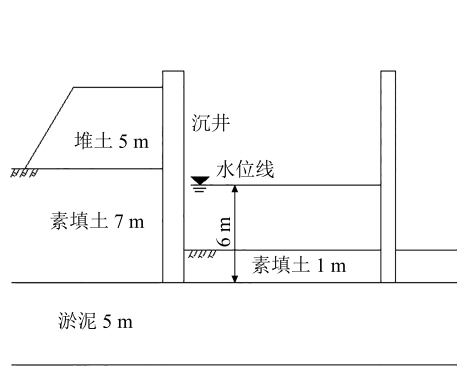


图 6 计算工况示意图

Fig.6 Schematic diagram of calculation conditions

摩阻力极限值取 10 kPa, 淤泥层地基承载力特征值取 50 kPa。

沉井外壁周长 $c_1 = 116.8$ m, 内壁周长 $c_2 = 245.1$ m, 横截面面积为 $A = A_1 = 196.04$ m², 沉井自重为 $G = 6.37 \times 10^7$ N, 质量为 $m = 6.37 \times 10^6$ kg。

由于该工程沉井内侧土体高度为 1 m, 且沉井侧墙最大宽度为 1.2 m。刃脚底部土体为淤泥, 取 $\eta_d = 0$, $\eta_d = 1$, 则地基承载力修正后为 $f_a = 50 + 1 \times 16.7 \times (1 - 0.5) = 58.35$ kPa。

计算沉井侧壁摩阻力、刃脚端阻力以及浮力分别为 $R_f = 4.12 \times 10^7$ N, $R_i = 1.14 \times 10^7$ N, $R_w = 1.15 \times 10^7$ N。

则此时下沉极限阻力为 $F_j = 6.41 \times 10^7$ N。

由于 $F_j > F_i = G$, 此时沉井处于静力平衡状态。

采用器械挖出沉井刃脚局部土体, 使得沉井下沉。

工况 1: 工程中采取反铲挖掘机取土, 沉井侧壁摩阻力及刃脚端阻力会逐渐达到极限平衡状态, 其铲斗所能造成的最大取土面积为 1 m², 则单次产生的最大初始下沉不平衡力为 $\Delta F_1 = 5.84 \times 10^4$ N。

该工况下沉井下沉量、下沉时间、最大下沉速度分别为 $x_{\max} = 0.01$ m, $t = 2.67$ s, $v_{\max} = 0.01$ m/s。

工况 2: 若沉井下沉施工开挖速度过快, 一次性挖除中间仓室下部土体, 其所造成的下沉阻力损失量约为 $\Delta F = 2.51 \times 10^6$ N。

产生的初始下沉不平衡力为 $\Delta F_1 = 2.10 \times 10^6$ N。

挖除中间仓室下部土体所造成的下沉位移以及最大速度为 $x_{\max} = 0.47$ m, $v_{\max} = 0.28$ m/s。

工况 3: 由于淤泥土灵敏度高, 沉井下沉施工导致软土扰动造成刃脚端阻力下降, 假设刃脚端阻力减半, 即下沉阻力损失量为 $\Delta F = 5.72 \times 10^6$ N。则产生的初始下沉不平衡力为 $\Delta F_1 = 5.30 \times 10^6$ N。

所产生的下沉位移量及最大速度为 $x_{\max} = 1.20$ m,

$v_{\max} = 0.71$ m/s。

工程中由于下沉施工取土速度较慢, 非淤泥地层中下沉实际情况更接近于工况 1, 沉井下沉控制良好。若出现取土速度过快或软土扰动, 则沉井下沉将会出现明显的快速下沉或突沉现象 (工况 2 或工况 3)。

由于沉井下沉过程中的运动参数难以监测, 且监测数据的准确性存在争议, 本文中未能获取工程现场下沉过程中的准确监测数据, 且现有的文献中也未见报道下沉过程中的监测数据结果。根据上述案例计算结果和现场施工的取土量与下沉量判断, 本文的理论计算方法是合理的。

5 下沉影响规律与控制技术

由上述理论分析可知, 影响下沉运动特性的主要参数为初始下沉加速度 a_1 以及反映土性和沉井结构特征的参数 b_1 。下沉最大位移值和下沉最大加速度均与 a_1 和 b_1 有关, 下沉时间只与 b_1 相关。在沉井结构几何参数及刃脚地层参数不改变的情况下, 任意下沉操作引起的下沉运动时间相同, 与下沉操作造成的初始下沉不平衡力无关。因此, 施工中沉井下沉过程主要控制参数为 a_1 , 即由下沉施工操作产生的初始下沉不平衡力 ΔF_1 控制。该值的大小决定了沉井下沉位移以及下沉最大速度, 当参数 b_1 (土性参数和沉井结构参数) 不改变的情况下, ΔF_1 为影响下沉运动特性的唯一因素。

参数 a_1 反映的是沉井的下沉因素, a_1 越大, 对应的下沉位移量及下沉速度越大。而参数 b_1 反映的则是下沉阻力因素, b_1 越大, 对应的下沉位移量及下沉速度越小。

综合上述计算及理论分析, 可以通过合理的方法对沉井下沉进行控制。

(1) 当能够准确获得地层条件及参数时, 可通过上述理论计算方法, 合理地调整初始下沉不平衡力 ΔF_1 , 控制沉井下沉位移量及下沉速度。不仅能够防止沉井突沉, 也能合理加快下沉速度, 缩短施工工期。防止突沉具体措施为, 通过减缓挖土速度控制下沉阻力损失量 ΔF ; 加固刃脚土体增大 f_a ; 增大沉井侧壁的摩阻力 f_{ki} 等减小 ΔF_1 。反之, 也可采用对应的措施合理加快下沉速度。

(2) 当出现下述情况时: ① 无法准确获得地层条件及参数; ② f_{kn} 较小时, 较小 ΔF_1 引发较大下沉位移; ③ 软土地层施工扰动可能造成刃脚端阻力大幅下降; 可通过增大参数 b_1 来有效防止沉井突沉。具体措施有: 加固刃脚土体, 增大 f_{kn} 和 f_a ; 在沉井

内部设置临时内隔墙, 增大 c ; 在地下水位以上的沉井截面绑定塑料等抗浮措施以增大 A_1 等。

调整初始下沉不平衡力 ΔF_1 是对沉井下沉运动控制最有效的手段, 能够准确地控制沉井下沉位移以及下沉速度。当 ΔF_1 在实际工程中难以精确控制时, 为防止沉井发生突沉, 便可采用增加沉井下沉阻力增量的方法 (即增大参数 b_1)。

6 结 论

(1) 建立沉井下沉受力分析模型, 推得沉井下沉的运动学方程, 揭示了沉井下沉的运动学特性。

(2) 沉井下沉位移及速度与初始下沉不均匀力 ΔF_1 正相关, 随 ΔF_1 增大而增大; 与反映土性和沉井结构特征的参数 b_1 负相关, 随 b_1 增大而减小; 下沉时间只与参数 b_1 有关。

(3) 初始下沉不平衡力 ΔF_1 为沉井下沉运动的主要控制指标, 决定了下沉过程中沉井的位移和速度大小。当 ΔF_1 难以精确控制时, 增大反映土性和沉井结构特征的参数 b_1 是预防沉井突沉的有效措施。

参 考 文 献

- [1] KUMAR M, CHATTERJEE K. Generalized interaction diagrams for caisson foundations in layered soil under seismic conditions[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2021, 21(8): 04021135.
- [2] ISKANDER M, EL-GHARBAWY S, OLSON R. Performance of suction caissons in sand and clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(3): 576-584.
- [3] 徐鹏飞, 李耀良, 徐伟. 压入式沉井施工对环境影响的现场监测研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(4): 1084-1094.
XU Peng-fei, LI Yao-liang, XU Wei. Field measurement and analysis of influence of jacked open caisson construction on environments[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 1084-1094.
- [4] 邓友生, 万昌中, 闫卫玲, 等. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. **岩土力学**, 2015, 36(2): 502-508.
DENG You-sheng, WAN Chang-zhong, YAN Wei-ling, et al. Stress of large cylindrical caisson structure and its adjacent settlement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 502-508.
- [5] 张计伟. 深厚软土地区超大型沉井下沉行为及稳定性分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
ZHANG Ji-wei. The research on subsidence behavior and stability analysis of ultra large open caisson in deep soft soil area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [6] 陈晓平, 茜平一, 张志勇. 沉井基础下沉阻力分布特征研究[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27(2): 148-152.
CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, ZHANG Zhi-yong. Study on penetration resistance distribution characteristic of sunk shaft foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(2): 148-152.
- [7] 梁穉稼, 徐伟, 徐赞云. 沉井下沉时土压力和侧壁摩阻力分析[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2014, 42(12): 1826-1832.
LIANG Se-jia, XU Wei, XU Zan-yun. Earth pressure and frictional resistance analysis on open caisson during sinking[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2014, 42(12): 1826-1832.
- [8] 王建, 刘杨, 张煜. 沉井侧壁摩阻力室内试验研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(3): 659-666.
WANG Jian, LIU Yang, ZHANG Yu. Model test on sidewall friction of open caisson[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 659-666.
- [9] 蒋炳楠, 马建林, 褚晶磊, 等. 水中超深大沉井施工期间侧压力现场监测研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(4): 1551-1560.
JIANG Bing-nan, MA Jian-lin, CHU Jing-lei, et al. On-site monitoring of lateral pressure of ultra-deep large and subaqueous open caisson during construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(4): 1551-1560.
- [10] 褚晶磊, 马建林, 蒋炳楠, 等. 水中沉井下沉期侧壁摩阻力分布试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2019, 41(4): 707-716.
CHU Jing-lei, MA Jian-lin, JIANG Bing-nan, et al. Experimental study on side friction distribution of caissons during sinking in water[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(4): 707-716.
- [11] 郭明伟, 董学超, 沈孔健, 等. 超大沉井基础取土下沉端阻力变化规律研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2021, 40(增刊 1): 2976-2985.
GUO Ming-wei, DONG Xue-chao, SHEN Kong-jian, et al. Study on the variation of the bottom resistance during sinking stage of super large caisson foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(Suppl.1): 2976-2985.
- [12] 田富有, 时刚. 沉井下沉过程刃脚的极限土阻力分析[J]. **岩土力学**, 2013, 34(增刊 1): 80-87.
YAN Fu-you, SHI Gang. Analysis of limiting soil resistance beneath cutting curb during sinking of open caisson[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl.1): 80-87.