

DOI: 10.11779/CJGE2020S2036

海床中落锚问题的模型试验和大变形有限元研究

王彦頤, 任宇晓*, 庄道坤, 高 鑫, 柴伟森, 闫澍旺

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 落锚在海床中的贯入问题既影响着后续的拖锚行为, 又对铺设于海底的管道、电缆、隧洞等有着较大的威胁。基于耦合欧拉-拉格朗日大变形有限元方法, 建立了关于落锚在黏性土海床上贯入问题的计算模型, 考虑了黏土强度与重度随深度的变化, 通过与模型试验结果的对比验证了模型的准确性。文章揭示了锚在贯入海床过程中锚的受力、速度及贯入深度等随贯入时间的发展规律, 并利用有限元模型分析了土体强度、初始触底速度等参数对落锚贯入问题的影响。

关键词: 耦合欧拉-拉格朗日; CEL; 落锚; 大变形分析; 模型试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0202-06

作者简介: 王彦頤(1989—), 女, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: wangydtju@163.com。

Study on anchor dropping in seabed based on model tests and large deformation finite element method

WANG Yan-di, REN Yu-xiao, ZHUANG Dao-kun, GAO Xin, CHAI Wei-sen, YAN Shu-wang

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract: The penetration of anchors in the seabed affects the subsequent towing behavior and poses a great threat to pipelines, cables and tunnels laid on the seabed. Based on the coupled Euler-Lagrangian large deformation finite element method, a model for calculating the penetration of anchors in the cohesive soil seabed is established. The variation of clay strength and gravity with depth is considered. The comparison between the numerical results and the model test results shows a good agreement. The development laws of anchor force, velocity and penetration depth during the penetration of the anchor into the seabed are revealed. The influences of the parameters of soil strength, initial bottoming speed and other parameters on the penetration of the anchor are analyzed.

Key words: coupled euler-lagrangian method; CEL; anchor dropping; large deformation analysis; model test

0 引言

在船只活动频繁水域, 船只抛落锚、拖锚、渔船拖网等行为对铺设在水底的结构物如海底管缆有着巨大的威胁^[1]。不过, 现有对海底结构物的预埋深度多依靠经验, 而海床土壤表层多为强度较低的淤泥、黏土, 船锚抛锚埋深较大。因此, 有必要对落锚在海床中的贯入问题进行深入研究。而以往对落锚问题的研究多集中在海洋工程锚上, 众多国内外学者对海工锚的前期结构设计、锚体安装、后期承载特性等环节通过模型试验、现场试验、理论或数值的方式进行了深入的研究^[2-5]。近年来关于船用锚在拖落锚方面的研究有所增多^[6-9]。

船锚在海床中的落锚运动是一个涉及锚结构、触底速度、锚土相互作用、海床土性及土体大变形等因素的动力贯入问题, 对于落锚过程中锚的受力、落锚

速度随贯入深度的实时发展规律, 以及落锚过程受海床土性、触底速度等因素的影响, 都需要进行深入系统的分析。

本文以通用的霍尔锚为例, 通过模型试验揭示了落锚运动规律。基于耦合欧拉-拉格朗日大变形有限元方法, 建立了落锚贯入海床土的数值计算模型, 考虑黏土强度和有效重度随深度的变化规律, 计算了落锚过程中落锚加速度、落锚速度与落锚贯入深度等的发展规律, 通过模型试验验证了计算模型的准确性, 并采用该模型讨论了黏性土强度、触底速度等因素对落锚问题的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878446); 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC40500)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者(E-mail: renyx66@163.com)

1 模型试验

1.1 试验设计

本文设计落锚模型试验, 旨在揭示落锚在海床中的贯入速度与深度的关系, 并为数值分析模型提供参考。试验选霍尔锚为研究对象, 以高岭土模拟海洋黏土, 通过真空堆载联合预压的方式制得不同强度的黏土试验, 改变锚的初始下落高度, 使锚自由落体以不同的触底速度贯入土中, 测得锚下落过程中实时的下落加速度, 通过对加速度积分得到其速度和下落高度变化, 进而得到锚在土中的最大贯入深度。

在如图 1 所示 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的试验槽中进行试验, 锚利用鱼线绑到挂钩上, 锚柄与锚爪固定在同一平面, 锚柄前端粘贴加速度传感器(质量为 6 g)。试验前锚悬挂到距离土表面一定高度, 锚静止时开启数据采集仪开始记录数据, 然后烧断鱼线, 锚自由下落贯入土中, 保存数据并停止采样。

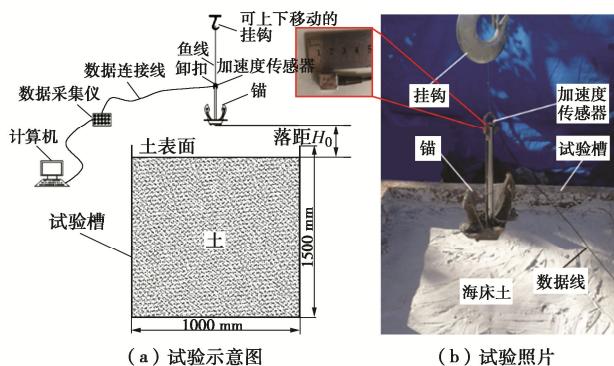


图 1 落锚模型试验

Fig. 1 Model tests on anchor dropping

将锚悬挂稳定后锚底部与土面的高差称为落距, 用 H_0 表示; 锚自由落体, 锚底接近土面时的瞬时速度称为触底速度, 用 v_T 表示; 锚底部最大的入土深度称为落深, 用 D_{\max} 表示。落距表征落锚贯入海床的初始条件(抛锚高度或落锚最大速度), 落深表征抛锚可能直接撞击海管的最大深度。由于人工测量难免存在误差, 对这两个数据都基于试验测试数据来确定。由黏贴在锚柄前端面的加速度传感器测得锚的下落加速度, 通过对加速度的连续积分得到锚的下落速度和下落高度, 加速度由重力加速度向负值转变的时刻表示锚底部开始接触土面, 此时的下落高度即为落距 H_0 , 其速度即为触底速度 v_T , 当相反的加速度导致锚的下落速度为 0 时, 锚达到本次试验的最大下落高度 H_{\max} , 它与落距的差值则为锚最大入土深度, 即落深 D_{\max} 。

1.2 试验用锚

根据相关标准^[10]制作了与 3 t 的原型锚的几何相似比 1:8 的模型锚, 其结构和具体尺寸见表 1 和图 2。

表 1 霍尔锚模型锚的尺寸

Table 1 Sizes of model anchor for Hall's anchor

锚质量 m_a/kg	锚冠和锚爪部分/mm						锚柄/mm				
	B	L	b_1	b_2	b_3	b_4	L_1	t_1	t	H	T
5.7	210	85	49	31	93	20	140	44	10	350	25

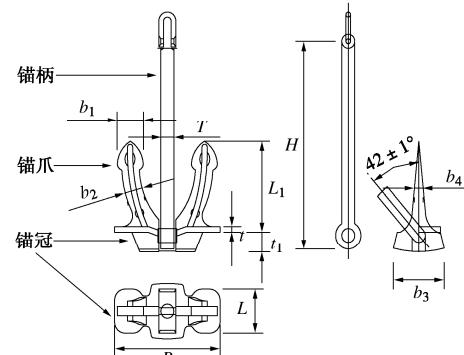


图 2 霍尔锚结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Hall's anchor

1.3 试验土样制备和性质

高岭土作为模型试验和原型试验的土体试样被广泛应用于诸多海洋岩土工程领域的研究中^[11]。本文高岭土的颗粒相对质量密度 G_s 为 2.61, 塑限 w_p 为 47%, 液限 w_L 为 76%, 塑性指数 I_p 为 29。模型试验时先将高岭土与水按 2.0~2.5 倍液限含水率混合, 充分搅拌排出泥浆中的气体, 采用真空-堆载联合排水固结的方式, 上下双向排水固结, 每次试验时撤去土样顶部堆载和排水系统, 测试其不同深度的含水率和不排水抗剪强度, 进行完落锚试验后恢复表层土继续固结。一共进行了 3 个强度下的落锚试验, 按时间顺序先后命名 3 次试验采用的黏土为黏土 1、黏土 2、黏土 3, 每次试验前测得的黏土不排水强度和含水率见图 3、4。

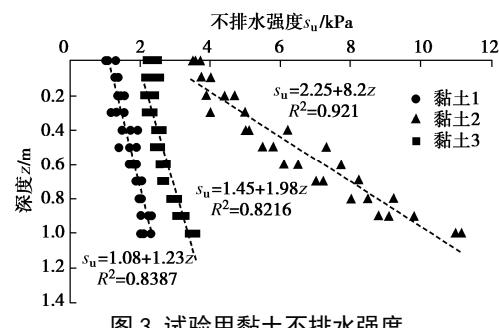


图 3 试验用黏土不排水强度

Fig. 3 Undrained strengths of clay

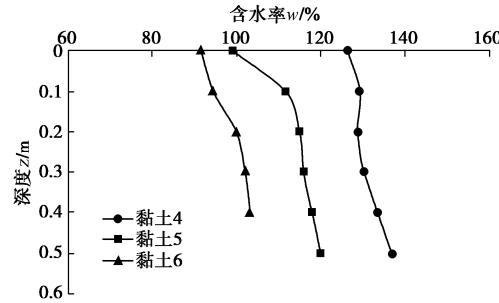


图 4 试验用黏土含水率

Fig. 4 Moisture contents of clay

1.4 模型试验结果

在3个强度的黏土中分别进行了若干次不同落距的落锚试验，以黏土1中的一次落锚试验为例，绘制了落锚过程中的下落加速度、速度、位移随时间的变化曲线，如图5所示。图5显示，在 $t_0=0.1$ s时刻锚开始下落；在 $t_1=0.432$ s时刻锚底面接近土面，此时触底速度 $v_T=3.267$ m/s，结合图6的下落速度-高度曲线可知，此时达到落距 $H_0=0.54392$ m；锚贯入土中的加速度曲线显示先后出现了3次峰值，第一次为锚底面触土的反力引起的，第二次为锚冠前板触土的反力引起的，此次反力值最大，对应时刻为 $t_3=0.448$ s，加速度为-47.8 m/s²，其后锚继续贯入土中，锚冠前板一直作为锚的最大迎土面积，因此锚将在一段时间内持续受到一个较大的反力，此即为第三次反力峰值；在 $t_2=0.526$ s时锚的下落速度降为0 m/s，此时达到峰值下落位移0.722 m，与落距相减即为此次试验的最大贯入深度——落深 $D_{\max}=177.6$ mm（图6）。在 t_2 时刻后，锚的速度会在0 m/s附件有所波动，对应的下落位移也有所变化，这是由于较软的黏土对落锚的反力波动，分析时不考虑。

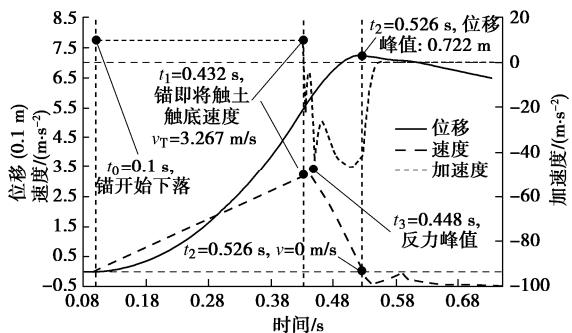


图5 黏土1中的落锚试验数据曲线

Fig. 5 Curves of anchor-dropping test data of clay 1

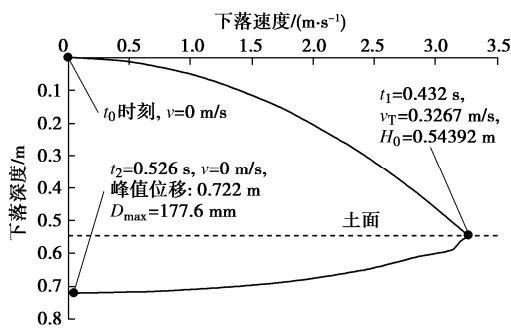


图6 黏土1中的落锚试验的下落深度与下落速度关系曲线

Fig. 6 Curves between falling depth and speed of anchor-dropping tests of clay 1

将3种黏性土中的所有落锚模型试验，参照上述试验结果处理方法，总结每次试验的落深和落距，绘制二者关系图并给出拟合曲线如图7所示。

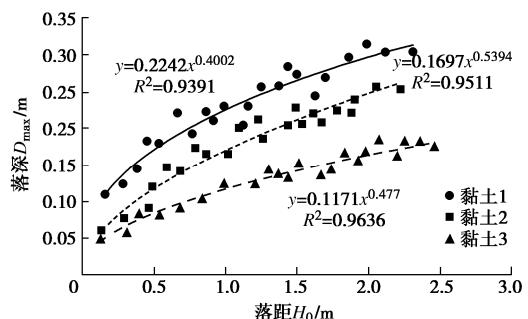


图7 不同强度黏土中的抛锚最大贯入深度与落距的关系

Fig. 7 Relationship between D_{\max} and H_0 in clays with different strength

图7表明黏土中落深与落距的关系用幂函数拟合曲线得到的 R^2 值更大。图7中曲线反映出3种黏土中落深都随落距增大而增大，不过增大趋势在逐渐放缓。随着黏性土强度增大落深逐渐减小。

2 耦合的欧拉-拉格朗日方法

耦合的欧拉-拉格朗日有限元分析方法(Coupled Eulerian-Lagrangian, 简称 CEL)^[12]综合了欧拉网格和拉格朗日网格各自的优点，以网格固定而材料在网格中自由流动的欧拉网格方式建立计算模型，有效解决了各类大变形及材料破坏问题，比如结构物贯入、拖锚和落锚引起土体隆起和运动等。

CEL方法采用显式动态分析，按中心差分方法对运动方程进行显式的时间积分，通过求解前一个增量步的动力学条件确定下一个增量步的动力学条件。

显式动态能够分析包括多个独立物体相互作用的复杂接触问题。锚与土体的接触采用欧拉体与拉格朗日体的接触算法，用拉格朗日网格分析结构的应力应变响应，常用的是通用接触，采用罚函数和有限滑动的接触离散方式，可以自动选择接触对的主从面，其基于加强的侵入边界方法，允许拉格朗日体占据欧拉网格的空单元，两者的分界面将自动被计算和追踪，同时，罚函数方法可允许欧拉体侵入到拉格朗日域内一定的过盈量(接触过盈)，欧拉体与拉格朗日体之间界面通过基于罚函数方法的广义接触算法模拟。

3 有限元计算模型

3.1 模型建立

建立如图8所示的落锚问题有限元计算模型，计算采用锚的尺寸如表1所示，为消除边界效应的影响，土体模型远大于试验槽尺寸，长、宽、高分别为2.6, 2.0, 1.5 m，顶部设置0.2 m空网格。土体模型采用八节点欧拉单元EC3D8R，为保证计算精度，其最小网格为4 mm，共约40万单元。锚采用八节点拉格朗日

单元 C3D8R。

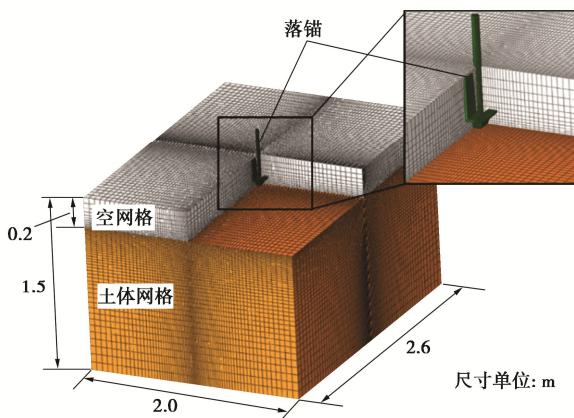


图 8 落锚计算模型

Fig.8 Numerical model for anchor dropping

3.2 模型参数

土体作为欧拉材料, 其赋值通过荷载模块的预定义场实现, 按照一定的欧拉体积分数 EVF 来指派。将海床黏性土视为理想弹塑性体, 采用 Tresca 屈服准则 ($\varphi=0^\circ$), 考虑土重和强度随深度的变化规律, 根据模型试验实测结果通过预定义场变量的方法设定, 弹性模量 E 取 100 倍的不排水强度, 泊松比 ν 为 0.49。根据 Skempton 的建议, 软黏土侧压力系数 K_0 取 0.62^[13]。

锚设置为刚体, 密度 7850 kg/m³, 弹性模量 210 GPa, 泊松比 0.2。计算开始前将锚置于土体表面。

在欧拉分析中默认采用通用接触, 黏土与锚的摩擦系数取黏土与锚的黏附系数 α_{soil} 取 0.33。约束锚体除竖向以外的其他 5 个自由度; 土体模型外表面施加相应的欧拉边界和速度边界。共设置地应力分析步和落锚分析步两步, 在地应力平衡后给锚体施加初始速度, 即触底速度, 对应着落锚试验时不同的落距。

4 数值计算结果与分析

4.1 计算结果验证

利用有限元模型计算了模型试验在 3 种强度黏土中的落锚过程, 限于篇幅, 仅对比黏土 1 和黏土 3 中的数值计算和试验结果, 分别如图 9, 10 所示。

图 9, 10 可以看出, 不同强度的黏土中, 锚以不同触底速度下落, 受到的反力(加速度)、落锚速度、下落深度随时间实时发展规律与试验结果都非常吻合, 证明了该模型在模拟落锚贯入问题上的准确性。

另外, 在图 9(a), 10(a) 的速度 - 深度曲线中, 可以看到在约 45 mm 处有明显的拐点, 该深度与锚冠厚度 t_1 相同, 这是由于当锚的贯入深度超过该深度时, 锚的入土投影面积突然增大到整个锚冠面积, 锚所受

阻力突然增大, 对应地, 在图 9(b), 10(b) 的加速度曲线中, 可以看到除了锚一开始接触土面时产生的反力峰值, 紧接着又产生了一次较初始峰值更大的峰值, 这就是锚冠入土产生的反力峰值。

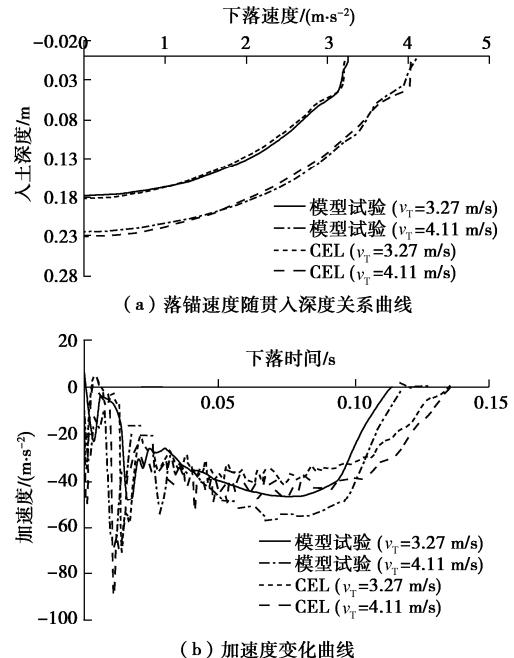


图 9 计算结果验证: 黏土 1 ($v_T = 3.27 \text{ m/s}$, $v_T = 4.11 \text{ m/s}$)

Fig. 9 Verification of calculated results of clay 1

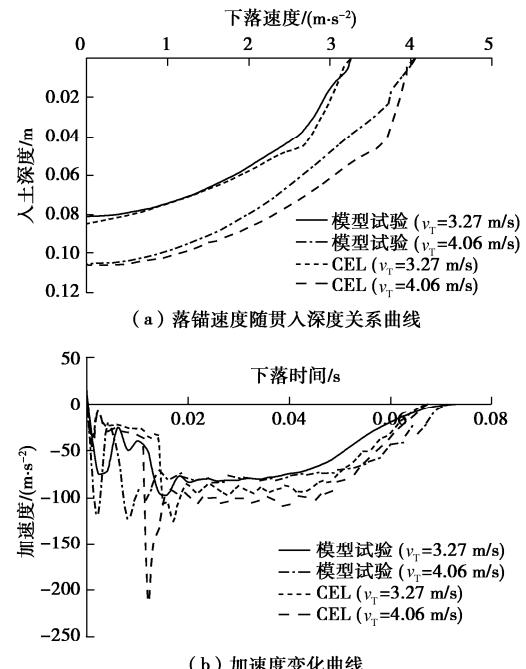


图 10 计算结果验证: 黏土 3 ($v_T = 3.27 \text{ m/s}$, $v_T = 4.06 \text{ m/s}$)

Fig. 10 Verification of calculated results of clay 3

4.2 黏土海床不排水强度对落锚的影响

基于数值模型, 采用相同初始触底速度, 计算该锚在上述强度的黏土中的落锚运动, 绘制落锚加速度、速度以及贯入深度等数据的变化规律如图 11 所示。

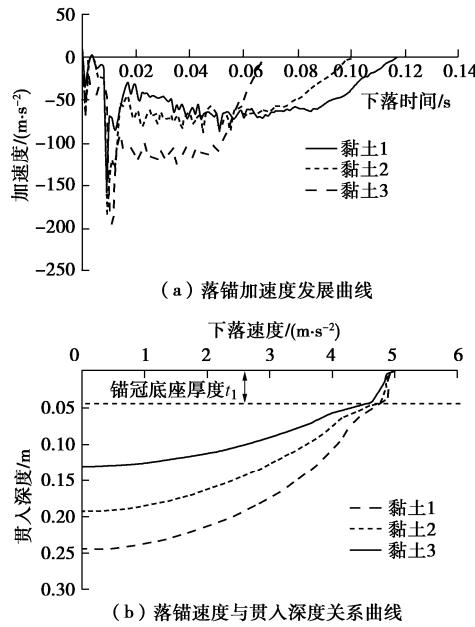


图 11 黏性土不排水强度对落锚运动的影响

Fig. 11 Influences of s_u on anchor dropping

由图 11 (a) 的加速度曲线可以看出, 3 种强度的黏土中锚冠底座和锚冠前板分别触底的反力峰值出现时间节点基本相同, 不过在反力数值上有明显的区别, 强度大的土体中锚的加速度值较大; 反映在图 11 (b) 的落锚速度 - 深度曲线中, 不同强度的黏土对落锚的影响明显, 强度大的黏土中落锚速度降低较快, 最终达到的落深 D_{\max} 也要明显小于强度小的黏土。

4.3 触底速度对落锚的影响

基于本文模型, 研究了触底速度对落锚运动的影响, 将黏土 1, 3 中计算结果绘制在图 12, 13 中。

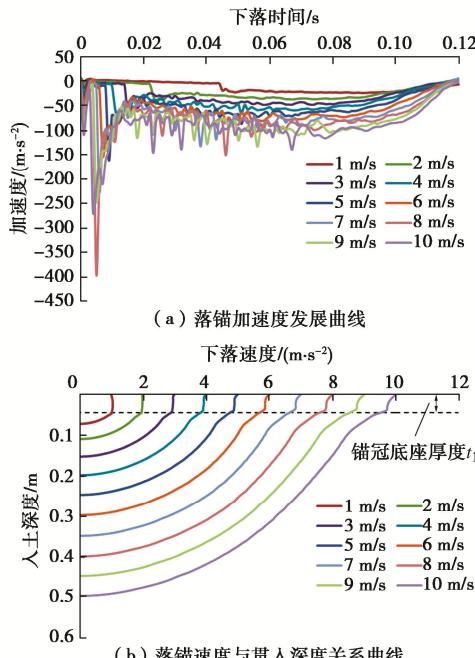


图 12 触底速度对落锚贯入过程的影响 (黏土 1)

Fig. 12 Influences of landing speed on anchor dropping (clay 1)

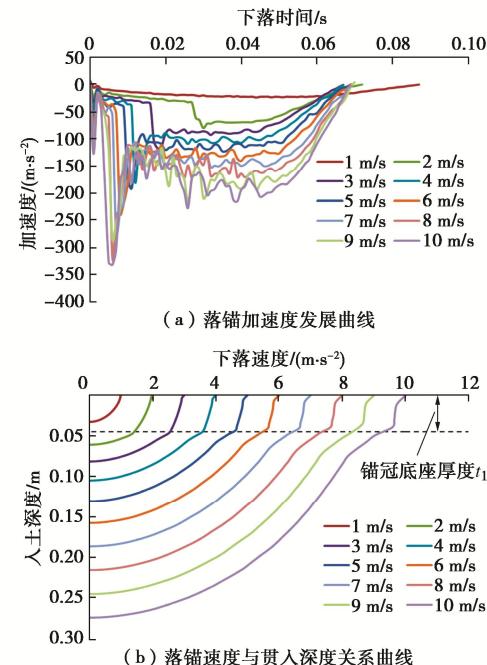


图 13 触底速度对落锚过程的影响 (黏土 3)

Fig. 13 Influences of landing speed on anchor dropping (clay 3)

从图 12, 13 可以看出, 增大触底速度锚受到的加速度会明显增大, 落锚速度会减小的更快, 这是由于较大的初速度下, 锚受到的与速度有关的拖曳阻力增大的缘故。当然, 较大的触底速度下落锚的落深会逐渐增大。对比图 12, 13 也可看出, 在强度较大的黏土 3 中, 锚入土后受到的峰值阻力要明显大于黏土 1 中。

将上述 3 个强度的黏土中触底速度由 1~10 m/s 的落锚结果整理, 绘制落深随触底动能的变化规律如图 14 所示, 可以看出, 随着触底速度的增大, 落锚在黏性土海床中的落深将持续增大, 另外, 落深随触底动能的增长曲线将逐渐放缓。

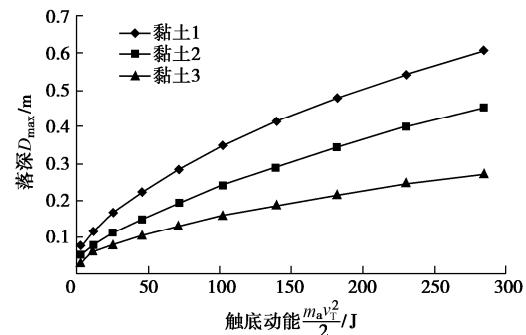


图 14 不同触底速度的落锚在黏性土海床中的落深

Fig. 14 Values of D_{\max} at different landing speeds in clay

5 结论与建议

本文基于耦合的欧拉-拉格朗日方法, 建立了落锚贯入海床土的数值计算模型, 通过模型试验验证了计算模型的准确性, 并采用该大变形有限元模型, 讨论了黏性土强度、触底速度等对落锚的影响, 得到以下 3 点结论。

(1) 通过模型试验测试结果, 直观地揭示了落锚过程中锚加速度、速度、下落深度随时间的变化规律。

(2) 海床土体强度和触底速度, 以及锚的结构特点, 直接影响着锚的贯入过程。海床强度大、触底速度小、锚的水平面投影面积大, 锚在海床中的贯入深度较小。

(3) 数值计算结果与模型试验实测结果吻合良好, 证明了 CEL 方法在分析此类大变形贯入问题上的准确性, 可为类似分析提供参考。

参考文献:

- [1] 方 娜, 陈国明, 朱红卫, 等. 海底管道泄漏事故统计分析 [J]. 油气储运, 2014, 33(1): 99 – 103. (FANG Na, CHEN Guo-ming, ZHU Hong-wei, et al. Statistical analysis of leakage accidents of submarine pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 99 – 103. (in Chinese))
- [2] RAI M S, TASSOULAS J L. Installation of torpedo anchors: numerical modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1805 – 1813.
- [3] 刘 君, 张雪琪. 板翼动力锚水中自由下落过程数值模拟 [J]. 海洋工程, 2017, 35(3): 29 – 36. (LIU Jun, ZHANG Xue-qi. Numerical simulation of the installation of gravity installed plate anchors in water[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(3): 29 – 36. (in Chinese))
- [4] CHANG K, HOSSAIN M S, WANG D, et al. Performance of a novel dynamically installed fish anchor in calcareous silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(6): 1 – 14.
- [5] 刘 君, 李明治, 韩聪聪. 土体率效应对动力锚沉贯深度影响[J]. 大连理工大学学报, 2017(1): 68 – 77. (LIU Jun, LI Ming-zhi, HAN Cong-cong. Influence of soil strain-rate effect on embedment depth of dynamically installed anchors[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2017(1): 68 – 77. (in Chinese))
- [6] 韩聪聪, 陈学俭, 刘 君. 霍尔锚抛锚深度模型试验研究 [J]. 海洋工程, 2018, 36(5): 90 – 98. (HAN Cong-cong, CHEN Xue-jian, LIU Jun. Model tests on penetration depth of hall anchor[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(5): 90 – 98. (in Chinese))
- [7] 王 懿, 贾 旭, 黄 俊, 等. 基于 CEL 的船舶抛锚入泥深度分析[J]. 石油机械, 2014, 42(12): 44 – 47. (WANG Yi, JIA Xu, HUANG Jun, et al. Analysis of penetration depth of dropped anchor based on CEL[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(12): 44 – 47. (in Chinese))
- [8] 闫澍旺, 任宇晓, 孙立强, 等. 砂土中的拖锚模型试验及锚抓力计算方法研究[J]. 中国造船, 2016, 57(1): 103 – 115. (YAN Shu-wang, REN Yu-xiao, SUN Li-qiang, et al. Model test and calculation of holding capacity of hall anchor in dragging process in sand[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(1): 103 – 115. (in Chinese))
- [9] 任宇晓, 闫澍旺, 闫 玥, 等. 基于 CEL 方法对拖锚过程的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1573 – 1578. (REN Yu-xiao, YAN Shu-wang, YAN Yue, et al. Numerical analysis on dragging anchors in soil based on CEL[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1573 – 1578. (in Chinese))
- [10] 霍尔锚: GB/T 524—2016[S]. 2016. (Hall Anchor: GB/T 524 —2016[S]. 2016. (in Chinese))
- [11] HOUSE A R, RANDOLPH M F. Installation and pull-out capacity of stiffened suction caissons in cohesive sediments [C]// Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2011.
- [12] NOH W F. CEL: A Time-dependent, Two-Space-Dimensional, Coupled Eulerian-lagrange CODE[M]. Livermore, California: Lawrence Radiation Lab, University of California, 1963.
- [13] SKEMPTON A W, SOWA V A. The behavior of saturated clays during sampling and testing[J]. Géotechnique, 1963, 13(4): 269 – 290.

(编校: 孙振远)