



沉箱偏心浮运安全性研究

李善新

(大港油田第四采油厂, 天津 300280)

摘要: 非轴对称沉箱在长距离浮运过程中可能出现结构偏心问题。基于沉箱在偏心状态下所受静水压力分布, 利用力矩平衡法原理, 得到偏心沉箱初始倾角的计算方法, 并以吃水型宽比和偏心距型宽比为变量, 计算出外形尺寸与质量分布对初始倾角的影响, 最终根据沉箱的重力-浮力的几何关系推算出偏心沉箱的定倾半径, 并总结了初始倾角及型宽吃水比对定倾半径的影响规律。该研究提供了沉箱偏心浮运的浮游稳定的计算方法, 可为长距离沉箱浮运的安全储备评估提供依据。

关键词: 偏心沉箱; 定倾半径; 浮游稳定; 力矩平衡法

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0051-05

Floating safety of eccentric caisson

LI Shanxin

(Fourth Oil Extraction Plant Dagang Oilfield Co., Ltd., Tianjin 300280, China)

Abstract: The non-axisymmetrical caisson may be eccentric in long distance floating transport. Based on hydrostatic pressure distribution of eccentric caisson, the calculation method of initial inclination angle is deduced by using the water pressure moment balance method, and the ratio of draft to width and eccentric distance to width are taken as variables to evaluate the effect of boundary dimension and distribution of mass on initial inclination angle. Finally, according to the geometric relationship between gravity and buoyancy of caisson, metacentric radius of eccentric caisson is calculated, and the influence law of initial inclination angle and ratio of width to draft on metacentric radius is summarized. This study provides a method for calculating the floating stability of caisson floating, which can provide a basis for evaluating the safety reserve of long distance floating transport.

Keywords: eccentric caisson; metacentric radius; floating stability; moment balance method

沉箱是一种在码头及防波堤等工程中常见的构件, 具有整体性好、耐久性好、建造周期短等优势, 在硬质海岸地带的涉水工程中得到广泛应用。沉箱结构施工通常经过预制、下水、浮运、安装等工序, 因工程需要, 沉箱常为不完全轴对称结构, 下水前通常通过压舱水或其他压载材料进行调平, 使其质心在对称轴上, 但在实际操作中又存在远距离运输过程中因压舱水水位变化或受限于隔墙承载能力不能完全调平的情况。目前

国内核算沉箱浮游稳定主要是依据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[1]的算法进行判定, 其计算基础是摆动小倾角假定。由于偏心沉箱是在已有初始倾角基础上再产生摆动角, 即总体偏转角不完全符合原有假定, 需考虑初始倾角对定倾高度的影响。同时受初始倾角影响, 沉箱的最大吃水及干舷较平衡状态的安全度也有所降低, 均需采用对应算法计算以确保安全。目前国内对沉箱在特殊浮运状态的研究主要集中在异形沉箱平衡状

收稿日期: 2022-11-22

作者简介: 李善新 (1971—), 男, 工程师, 从事油气田开发、油气用海管理、浅海油气田航道及助航设施管理工作。

态下的浮游稳定分析^[2-4], 而对于偏心沉箱的浮运研究尚不多见, 本文结合船舶航行稳定性^[5]计算方法相类似, 对于均质沉箱, 当静止平衡状态时, 结构的质心 G 与浮心 C 在同一垂线上。因外力作用产生倾角 θ 后, 浮心由 C 移动至 C' 处, 当 $\theta \rightarrow 0$ 时, 曲线 CC' 可看做以 M 点为圆心, CM 为半径的圆弧。因此可假定产生小倾角 ($\theta < 15^\circ$) 时, 浮力作用线均通过 M 点 (初稳心定倾中心), CM 连线长度 ρ 为定倾半径, 其受力状态如图 1 所示。通常质心 G 在浮心 C 点之上。当定倾半径大于重心至浮心距离, 即 M 点高于 G 点时, 若沉箱产生倾角 θ , 重力与浮力形成一个力偶, 使沉箱回复到平衡状态。

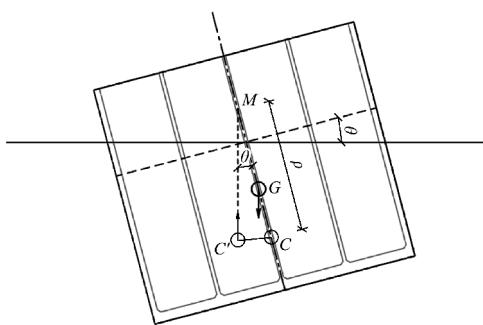
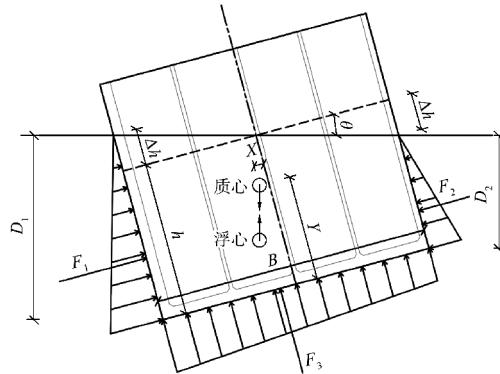


图 1 均质沉箱小倾角摆动受力

当沉箱质心不在外轮廓的几何对称轴位置时, 沉箱水平下水后, 质心与浮心不在同一条垂线上, 重力与浮力形成一个旋转力偶, 使沉箱向偏心侧倾倒。沉箱质量一定, 因此临界浮力的 $V_{排}$ 不变, 当沉箱水面外轮廓为对称结构时, 会以静水面处形心为轴产生的产生旋转, 重新分配水下体积分布, 直至质心与浮心位置在竖向重合, 倾覆力偶归零, 形成新的受力平衡。当沉箱质量一侧轴对称一侧偏心, 其初始平衡状态下的受力分布见图 2, 其受水压力及浮心计算见式(1)~(6)。



注: B 为沉箱底宽, m ; θ 为初始倾角, $(^\circ)$; h 为同等外轮廓、同等质量均质沉箱的平均吃水, m ; D_1 、 D_2 为偏心侧和非偏心侧沉箱吃水, m ; F_1 、 F_2 、 F_3 为沉箱两侧面及底面的静水压力合力, kN/m 。

图 2 偏心沉箱初始平衡状态受力

$$\Delta h = \frac{B}{2} \tan \theta \quad (1)$$

$$D_1 = h \cos \theta + \frac{B}{2} \sin \theta \quad (2)$$

$$D_2 = h \cos \theta - \frac{B}{2} \sin \theta \quad (3)$$

$$F_1 = \frac{\rho g D_2 (h + \Delta h)}{2} \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{\rho g D_2 (h - \Delta h)}{2} \quad (5)$$

$$F_3 = \frac{\rho g (D_1 + D_2) B}{2} \quad (6)$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

水压力 F_1 、 F_2 、 F_3 产生的水平合力大小为 0, 坚向合力为 $\rho g V_{排}$, 为确定偏心沉箱平衡状态下的初始倾角, 对静水面截面对称轴取距, 合力矩 (以向偏心侧倾倒为正) 为:

$$M_1 = F_1 \left(h - \frac{h + \Delta h}{3} \right) = \frac{F_1}{3} (2h - \Delta h) \quad (7)$$

$$M_2 = -F_2 \left(h - \frac{h - \Delta h}{3} \right) = -\frac{F_2}{3} (2h + \Delta h) \quad (8)$$

$$M_3 = F_3 \left[\frac{B}{2} - \frac{B}{3} \left(\frac{2D_1 + D_2}{D_1 + D_2} \right) \right] = \frac{F_3 B}{6} \left(\frac{D_2 - D_1}{D_1 + D_2} \right) \quad (9)$$

$$M_b = M_1 + M_2 + M_3 \quad (10)$$

式中: M_1 、 M_2 、 M_3 为沉箱两侧面及底面静水压力对沉箱静水面截面对称轴的力矩, $(kN \cdot m)/m$; M_b 为静水压力对沉箱静水面截面对称轴的合力矩, $(kN \cdot m)/m$ 。

将式(1)~(6)代入，最终求得合力矩为：

$$M_b = \frac{\rho g B}{6} \sin \theta \left[3h^2 - \frac{B^2}{2} \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{2} \right) \right] \quad (11)$$

外形为规则矩形时，浮力在横断面方向合力为 F_b 即 $\rho g B h$ ，因此浮力对静水面截面对称轴的偏心距 e_b (以在非偏心侧为正) 为：

$$e_b = \frac{\sin \theta}{6} \left[3h - \frac{B^2}{2h} \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{2} \right) \right] \quad (12)$$

对于沉箱质心的偏心距，以距外轮廓几何对称轴的距离为 X ，距沉箱底面高度为 Y ，当有初始倾角 θ 时，重力偏心距 e_g 为：

$$e_g = (h - Y) \sin \theta - X \cos \theta \quad (13)$$

当 $e_b = e_g$ 时，质心与浮心在同一轴线上，带入得式(14)，即可得沉箱平衡时的初始倾角 θ 。

$$\frac{B}{4h} \tan^3 \theta + \left(\frac{B}{2h} + 3 \frac{h}{B} - 6 \frac{Y}{B} \right) \tan \theta - 6 \frac{X}{B} = 0 \quad (14)$$

2 参数对初始倾角的影响

根据式(14)，与偏心沉箱初始倾角 θ 有关的参数有吃水与型宽比值 h/B 、偏心距与型宽的比值 X/B 与 Y/B ，以下选取不同参数的组合计算结构的初始倾角，结果见图 3。

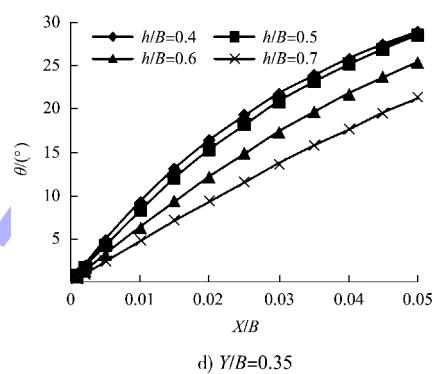
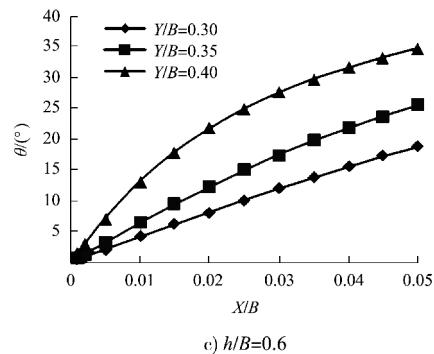
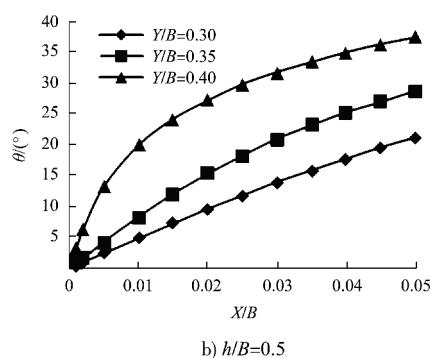
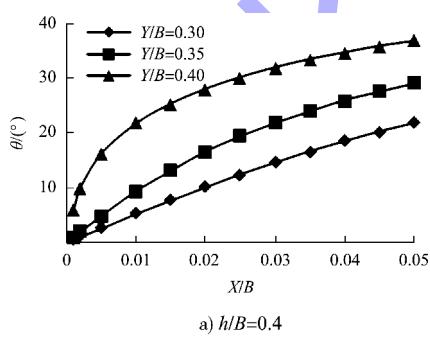


图 3 不同条件下 X/B 与 θ 关系

由图 3 可知，当 X/B 增加，达到平衡状态的初始倾角 θ 同步增加，当 X/B 超过 0.02 后， θ 基本在 10° 以上；当 h/B 一定时， Y/B 越高， θ 越大，当达到 0.4 以后，一个很小的水平偏心值 X 也将产生很大的初始倾角。由图 3b) 可知，当重心高度与型宽比值不变， h/B 越大， θ 越小，说明当质心与浮心垂向高度越接近，偏心产生的倾角越小。

3 偏心沉箱的浮游稳定性分析

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》，在沉箱浮运拖带过程中，除要对吃水、干舷高度等内容进行验算外，还需对浮游稳定性进行核算，浮游稳定性即通过计算定倾半径判断浮力与重力在发生小倾角时是否可形成回复力偶，使沉箱能够自动回正。

在产生初始倾角 θ 后，再发生一个小倾角 $\Delta\theta$ ，此时结构水面下体积再次重新分配，总浮力未发生变化，但浮心由平衡位置 C 变换到新位置 C' 处。见图 4。

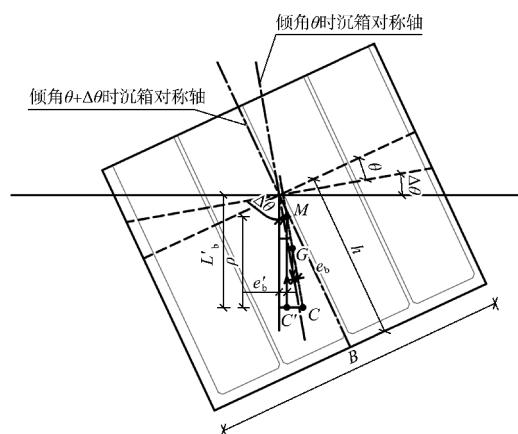


图 4 定倾半径

由于偏心浮运沉箱受初始倾角及偏心距的影响，不能简单套用《码头结构设计规范》对定倾半径的计算方法，根据偏心浮运特点对定倾半径进行推导：沉箱达到初始平衡后，在沉箱偏转角度 θ 后，质心与浮心在同一垂线上，达到受力平衡，此时距静水面截面中心线的偏心距为 e ，当产生新的偏转角 $\Delta\theta$ 后，浮心由 C 点移动至 C' 点，偏心距由 e 变换为 e' ，以 C' 点上画垂线，垂线与原浮心 C 与质心 G 连线交点为定倾中心 M ， MC 即为定倾半径 ρ ，计算方法如下：

$$\rho = L'_b - \frac{e'_b}{\tan \Delta \theta} + \frac{e_b}{\sin \Delta \theta} \quad (15)$$

$$L'_b = \frac{h}{2} \cos(\theta + \Delta\theta) + \frac{B^2}{24h} \tan(\theta + \Delta\theta) \sin(\theta + \Delta\theta) \quad (16)$$

$$e'_b = \frac{\sin(\theta + \Delta\theta)}{6} \left[3h - \frac{B^2}{2h} \left(1 + \frac{\tan^2(\theta + \Delta\theta)}{2} \right) \right] \quad (17)$$

当沉箱质量轴对称分布时，初始倾角 θ 为 0，假定 $\Delta\theta \rightarrow 0$ ，利用式(15)计算的定倾半径与规范结果相当，但当 θ 角逐渐增加，初始稳定状态带来的影响逐渐加大， $\theta + \Delta\theta$ 已不能按小偏心进行简化，应分具体情况进行分析。将式(15)两侧除 h ，则得到 $\rho/h = f(B/h, \theta)$ ，以下根据不同 B/h 以及 θ 计算出对应的定倾半径，见图 5。

从结果可以看出，初始倾角越大，定倾半径越大；型宽与平均吃水比值越大，定倾半径越大。

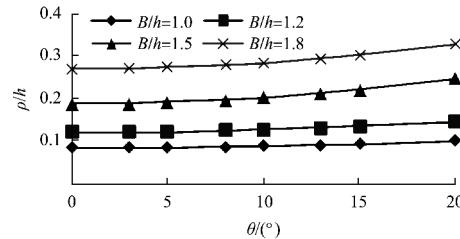


图 5 定倾半径计算结果

4 偏心沉箱浮运计算实例

某项目深水防波堤工程应用不等壁厚沉箱，沉箱平面尺寸为 $17.35 \text{ m} \times 18.65 \text{ m}$ ，三侧外壁厚 0.7 m ，一侧外壁厚 0.4 m ，其中一侧侧壁前后两个仓位处加厚至 1.3 m ，沉箱高 16.5 m ，前后两侧各设 1 m 宽前后趾，沉箱结构平面见图 6。

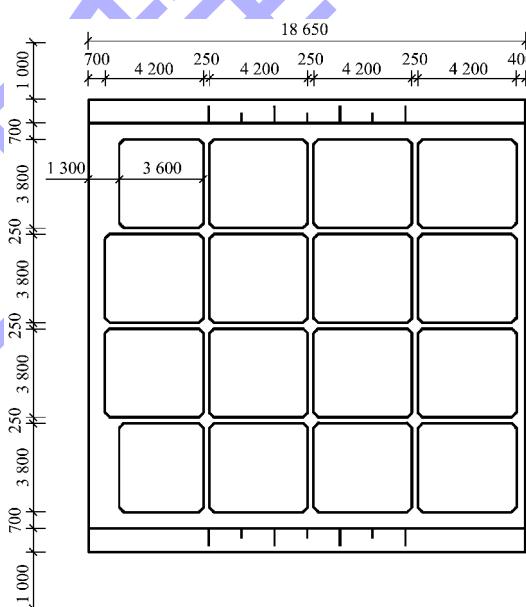


图 6 沉箱平面 (单位: mm)

该沉箱为前后壁轴对称、两侧侧壁不对称结构，存在结构上的偏心，在沉箱浮运前需进行灌水调平，但因浮运距离较远，为避免运输过程中压舱水变化造成的偏心，对调平以后可能出现的各种偏心情况进行核算，以保障浮运过程的安全。

主要对以下计算工况的吃水、干舷以及浮游稳定进行计算，各仓位（由左至右）压载水高度分别为：1) 0、0、3.3、5.5 m（质心与形心重合状态）；2) 0、0、3、5 m；3) 0、0.8、3、5 m；4) 0、1.8、3、4 m。计算结果见表 1。

表1 浮游稳定计算结果

工况	质量偏心距/mm	偏心侧吃水/m	倾角/(°)	干舷/m	定倾半径/m
1	0	12.17	0	4.32	2.00
2	64	12.33	2.0	4.00	2.42
3	90	12.58	2.6	3.90	2.39
4	232	13.14	6.5	3.24	2.44

由计算结果可知, 偏心浮运对沉箱带来的潜在安全隐患较多, 如计算工况2模拟灌水调平误差, 在总体积 $V_{排}$ 减小前提下, 因偏心加大, 最大吃水仍有增加; 计算工况3、4模拟因内部隔墙存在渗流造成的内部舱格内由高水头舱格向低水头舱格流失, 在 $V_{排}$ 不变的前提下, 工况4最大吃水仍增加了近1 m, 因此在具备条件的前提下出运时尽可能对沉箱进行精细调平。

5 结论

1) 偏心距型宽比与初始倾角、形心高度型宽比均与初始倾角成正相关关系; 平均吃水型宽比与初始倾角成负相关关系。

2) 初始倾角与定倾半径成正相关关系; 型宽平均吃水与定倾半径成正相关关系。

(上接第42页)

参考文献:

- [1] URSELL F, DEAN W. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water [J]. Mathematical proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1947, 43(3): 374-382.
- [2] WIEGEL R L. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier [J]. Journal of the waterways and harbors division(ASCE), 1960, 86(1): 1-12.
- [3] STEIMER R B, SOLLITT C K. Non-conservative wave interaction with fixed semi-immersed rectangular structure[J]. Coastal engineering, 1978, 16: 2209-2227.
- [4] LIU P L F, ABBASPOUT M. Wave scattering by a rigid thin barrier [J]. Journal of the waterways and harbors division(ASCE), 1982, 108(4): 479-491.
- [5] HAYASHI T, HATTORI M, KANO T, et al. Hydraulic research on the closely spaced pile breakwater[J]. Coastal engineering journal, 1966, 9(1): 873-884.
- [6] 邱大洪, 王学庚. 深水薄板式防波堤的理论分析[J]. 水运工程, 1986(4): 8-12.
- [7] 陈国平, 杨越. 岱山县燕窝山陆岛交通码头及防波堤工程波浪断面物理模型试验[R]. 南京: 河海大学, 2019.
- [8] 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构施工规范: JTS 215—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [9] 中交第一航务工程局有限公司, 福建省交通基本建设工程项目质量监督检测站. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [10] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [11] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

3) 偏心浮运会增加吃水和减小干舷, 不利于浮运安全, 而定倾半径在偏心状态下有所增加, 稳定性较平衡状态时略有增加。总体来说, 偏心浮运不应作为常规工况进行设计或施工, 特别是对于需乘潮浮运或干舷高度较小的沉箱应格外引起注意并做好安全储备的预估工作。

4) 本文所提供的的计算方法仅针对一侧轴对称一侧偏心的二维工况进行研究, 对于更复杂的空间偏心结构建议采用空间建模的方式, 更精确计算浮运过程中出现的各种状态。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 马勇, 方波, 谭彬政. 一种异型沉箱浮游稳定性高效计算方法[J]. 港工技术, 2022, 59(3): 8-13.
- [3] 杨彦豪, 姜淞云, 张志斌. 非对称异型沉箱浮游稳定性计算[J]. 水运工程, 2020(4): 144-149.
- [4] 董中亚. 椭圆沉箱浮游稳定的计算法[J]. 水运工程, 2011(1): 87-93.
- [5] 中国船舶工业集团公司, 中国船舶重工集团公司, 中国造船工程学会. 船舶设计实用手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

(本文编辑 王传瑜)

(本文编辑 王璁)