

# 细长细高方形沉箱浮游稳定特性分析

只红茹<sup>1</sup>, 李春良<sup>2</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250031)

**摘要:** 随着堆货荷载增大、船舶大型化以及海域使用要求高透空率, 细长细高方形沉箱越来越普遍。但细长沉箱的浮动稳定性较差。为研究细长细高方形沉箱浮游稳定性, 采用规则对称沉箱分 5 组分别变换沉箱的长度、宽度和高度进行对比计算, 总结不同外形尺度方沉箱浮游稳定参数特性。结论是: 1) 细长细高方形沉箱平面尺度越小, 其满足浮游稳定所需的相对吃水越大, 浮游稳定性越差。2) 沉箱总宽度是影响浮游稳定性最主要的参数, 总长度对相对吃水的影响远小于总宽度的影响。3) 沉箱高度较小时对相对吃水影响较大。随着沉箱高度的增大相对吃水将趋于定值。

**关键词:** 细长细高; 方沉箱; 浮游稳定性

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0054-04

## Floating stability characteristics of slender rectangular caissons

ZHI Hong-ru<sup>1</sup>, LI Chun-liang<sup>2</sup>

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250031, China)

**Abstract:** With the increase of cargo load, the enlargement of ships and the requirement of high permeability in the sea area, slender high square caissons are becoming more and more common, but the floating stability of slenderer caissons is poorer. To study the floating stability of slender high square caissons, the length, width and height of regular and symmetrical caissons are transformed into 5 groups respectively, and the characteristics of floating stability parameters of square caissons with different shapes and sizes are summarized. The conclusions are that: 1) The smaller the plane size of the slender rectangular caisson, the greater the relative draft required to meet the floating stability, and the worse the floating stability. 2) The total width of the caisson is the most important parameter affecting the floating stability. The effect of the total length on the relative draft is far less than that of the total width. 3) When the caisson height is small, it has a greater impact on the relative draft. However, with the increase of the caisson height, the relative draft will tend to be constant.

**Keywords:** slender; rectangular caisson; floating stability characteristics

由于重力式方沉箱结构具有整体性好、施工速度快等优点, 在我国大型水运工程中广泛应用, 是山东沿海青岛港、日照港、烟台港等港口最主要的结构形式。在满堂连片式码头中, 通常的沉箱结构设计、施工等经验已非常成熟。

为适应我国有关用海政策的调整, 透空式结构形式已成为沉箱重力式码头结构最具有生命力

的结构形式, 为达到尽量大的透空率、适应越来越大的堆货荷载以及船舶大型化发展的要求, 沉箱进一步向细长细高型方向发展。

沉箱浮运安装是沉箱重力式结构施工最关键的工序之一, 关于沉箱浮游稳定性分析已有大量研究。徐彦东等<sup>[1]</sup>探讨了计算方沉箱浮游稳定时选取参数应注意的问题, 提出以抵抗力矩来平衡

收稿日期: 2022-06-07

作者简介: 只红茹(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计工作。

方沉箱浮游稳定的计算方法；郭炳川等<sup>[2]</sup>研究了吊浮出运沉箱的浮游稳定性计算，得出定倾高度随吊力增大而增大、随压载增大而增大的结论；杨彦豪等<sup>[3]</sup>提出了非对称异形沉箱浮游稳定计算的通用方法；马勇等<sup>[4]</sup>对异形沉箱浮游稳定性高效计算方法进行了研究；侯勇等<sup>[5]</sup>研究了方沉箱浮游稳定特性随沉箱密度和前舱加水高度的变化规律，得出沉箱前舱加水高度过高会引起沉箱由稳定平衡变为不稳定平衡的结论；笔者通过计算发现，随着前舱加水高度变大，沉箱压载增大，更有利于沉箱稳定，不存在沉箱前舱加水过高会引起沉箱由稳定平衡变为不稳定平衡的状态。

本文对不同长宽高对称形方沉箱的浮游稳定特性进行研究，总结沉箱浮游稳定与长宽比、宽高比等参数的规律，更好指导细长细高形沉箱结构的设计和施工。

1 基本假定及计算工况

为便于对不同外形尺寸沉箱浮游稳定特性进行对比计算，假定沉箱为规则对称结构、不设外趾、底板顶部与隔墙及外部不设加强角、顶部不设置牛腿的结构，沉箱长度均不小于沉箱宽度。沉箱底板厚度取 0.8 m，外壁厚度取 0.4 m，纵横隔墙厚度取 0.2 m，竖向加强角取 0.25 m。

根据仓格尺度、仓格数量、沉箱高度等共分 5 组 5 种工况分别进行计算：

第 1 组：沉箱平面为长方形，长宽方向分别设置 6 个仓格和 2 个仓格，仓格尺度从 3 m 按 0.5 m 递增至 5 m，沉箱高度 21 m。

第 2 组：沉箱平面为长方形，仓格尺度为 4 m，长度方向设 6 个仓格，宽度方向从 1 个仓格递增至 5 个仓格，沉箱高度 21 m。

第 3 组：沉箱平面为正方形，仓格尺度为 4 m，长宽方向均从 1 个仓格递增至 5 个仓格，沉箱高度 21 m。

第 4 组：沉箱平面为长方形且平面尺度不变，仓格尺度为 4 m，长宽方向分别设置 6 个仓格和 2 个仓格，沉箱高度从 18 m 按 3 m 递增至 27 m，最后作为一种极限工况将沉箱高度增加至 200 m

进行对比计算。

第 5 组：沉箱平面为正方形且平面尺度不变，仓格尺度为 4 m，长宽方向均设置 3 个仓格，沉箱高度变化同第 4 组。

仓格尺度 4 m、长宽分别为 6 个仓格和 2 个仓格的典型沉箱结构见图 1，各沉箱外形主尺度见表 1。

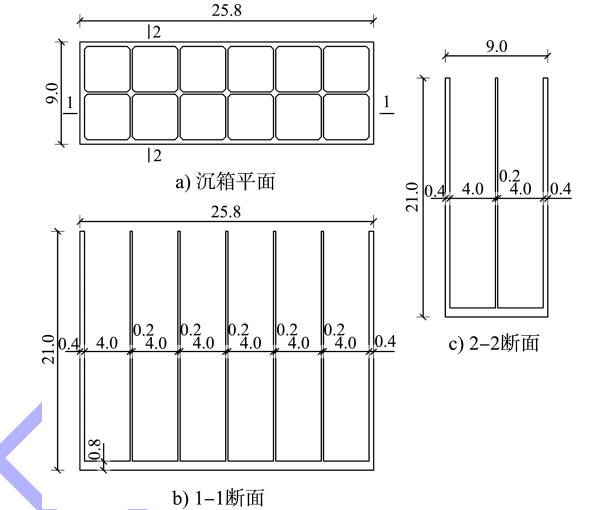


图 1 典型沉箱尺寸（单位：m）

表 1 不同工况沉箱主尺度

分组	工况	长度 L/m	宽度 B/m	高度 H/m	质心 高度/m
1	1	19.8	7.0	21.0	9.37
	2	22.8	8.0	21.0	9.18
	3	25.8	9.0	21.0	9.00
	4	28.8	10.0	21.0	8.83
	5	31.8	11.0	21.0	8.67
2	1	25.8	4.8	21.0	9.36
	2	25.8	9.0	21.0	9.00
	3	25.8	13.2	21.0	8.83
	4	25.8	17.4	21.0	8.72
	5	25.8	21.6	21.0	8.65
3	1	4.8	4.8	21.0	9.71
	2	9.0	9.0	21.0	9.27
	3	13.2	13.2	21.0	9.01
	4	17.4	17.4	21.0	8.83
	5	21.6	21.6	21.0	8.70
4	1	25.8	9.0	18.0	7.55
	2	25.8	9.0	21.0	9.00
	3	25.8	9.0	24.0	10.47
	4	25.8	9.0	27.0	11.94
	5	25.8	9.0	200.0	98.21
5	1	13.2	13.2	18.0	7.55
	2	13.2	13.2	21.0	9.01
	3	13.2	13.2	24.0	10.47
	4	13.2	13.2	27.0	11.94
	5	13.2	13.2	200.0	98.22

2 计算方法及成果分析

2.1 计算方法

沉箱浮游稳定性根据现行码头结构设计规范<sup>[6]</sup>有关规定计算:

$$m=\rho-a \tag{1}$$

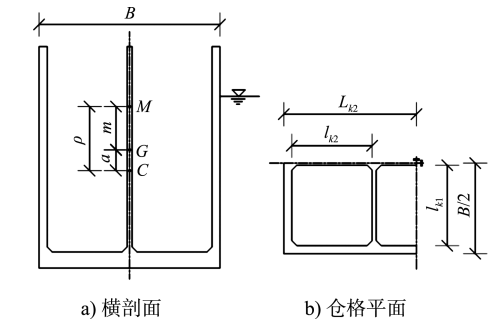
$$\rho=\frac{I-\sum i}{V} \tag{2}$$

$$I=\frac{LB^3}{12} \tag{3}$$

$$i=\frac{l_{k2}l_{k1}^3}{12} \tag{4}$$

式中:  $m$  为定倾高度 (m);  $\rho$  为沉箱定倾半径 (m);  $a$  为沉箱质心到浮心距离 (m);  $I$  为沉箱在吃水面处的断面对纵向中心轴的惯性矩 (m<sup>4</sup>);  $i$  为第  $k$  箱格内压载水的水面对该水面纵向中心轴的惯性矩 (m<sup>4</sup>);  $V$  为沉箱的排水量 (m<sup>3</sup>);  $L$  为沉箱长度 (m);  $B$  为沉箱在水面处的宽度 (m);  $l_{k1}$  为第  $k$  箱格纵向墙之间的净距 (m);  $l_{k2}$  为第  $k$  箱格横

向墙之间的净距 (m)。混凝土密度均取 2.45 t/m<sup>3</sup>, 海水密度均取 1.025 t/m<sup>3</sup>。沉箱定倾半径计算示意图 2。



注:  $M$  为定倾中心;  $G$  为沉箱及压载水的质心;  $C$  为浮心。

图 2 沉箱定倾半径  $\rho$  计算

2.2 计算结果

参考码头结构设计规范, 按远程浮运、以水作为压载物确定各工况下定倾高度  $m=0.4$  m 作为控制标准, 在同一标准下评价不同外形尺寸沉箱的浮游稳定特性, 不同工况下沉箱浮游稳定计算结果见表 2。

表 2 不同工况下沉箱浮游稳定计算结果

分组	工况	箱内灌水/m	沉箱吃水/m	相对吃水	浮心高度/m	质心高度/m	定倾半径 $\rho$ /m	质心到浮心距离 $a$ /m	定倾高度 $m$ /m
1	1	4.42	16.49	0.79	8.25	8.06	0.21	-0.19	0.40
	2	4.92	15.60	0.74	7.80	7.69	0.29	-0.11	0.40
	3	5.18	14.83	0.71	7.42	7.40	0.38	-0.02	0.40
	4	5.25	14.11	0.67	7.06	7.15	0.490	0.09	0.40
	5	5.18	13.41	0.64	6.71	6.93	0.62	0.22	0.40
2	1	4.75	16.71	0.80	8.36	8.01	0.05	-0.35	0.40
	2	5.18	14.83	0.71	7.42	7.40	0.38	-0.02	0.40
	3	4.25	13.25	0.63	6.62	7.23	1.01	0.61	0.40
	4	2.64	11.46	0.55	5.73	7.43	2.10	1.70	0.40
	5	0.50	9.36	0.45	4.68	8.31	4.03	3.63	0.40
3	1	2.55	18.68	0.89	9.35	9.00	0.05	-0.35	0.40
	2	4.49	15.86	0.76	7.93	7.89	0.36	-0.04	0.40
	3	4.07	13.94	0.66	6.97	7.53	0.96	0.56	0.40
	4	2.65	11.91	0.57	5.96	7.58	2.02	1.62	0.40
	5	0.55	9.59	0.46	4.80	8.33	3.93	3.53	0.40
4	1	3.95	12.54	0.70	6.27	6.32	0.45	0.05	0.40
	2	5.18	14.83	0.71	7.42	7.40	0.38	-0.02	0.40
	3	6.38	17.11	0.71	8.56	8.49	0.33	-0.07	0.40
	4	7.58	19.38	0.72	9.69	9.58	0.29	-0.11	0.40
	5	73.37	147.61	0.74	73.81	73.45	0.04	-0.36	0.40

续表2

分组	工况	箱内灌水/m	沉箱吃水/m	相对吃水	浮心高度/m	质心高度/m	定倾半径 $\rho$ /m	质心到浮心距离 $a$ /m	定倾高度 $m$ /m
5	1	2. 67	11. 50	0. 64	5. 75	6. 52	1. 17	0. 77	0. 40
	2	4. 07	13. 94	0. 66	6. 97	7. 53	0. 96	0. 56	0. 40
	3	5. 39	16. 31	0. 68	8. 16	8. 58	0. 82	0. 42	0. 40
	4	6. 68	18. 66	0. 69	9. 33	9. 65	0. 72	0. 32	0. 40
	5	73. 15	147. 60	0. 74	73. 80	73. 49	0. 09	-0. 31	0. 40

2.3 浮游稳定与沉箱尺度的关系

表 2 列出了不同尺度沉箱浮游稳定主要参数, 对某一确定外形尺寸的沉箱, 在定倾高度  $m=0.4\text{ m}$  时其相对吃水(沉箱吃水与沉箱高度的比值)越小, 说明该类型沉箱越容易满足浮游稳定要求。沉箱浮游稳定状态的相对吃水可作为评价浮游稳定性的主要指标, 浮游稳定状态下的相对吃水与沉箱尺度关系如下:

1)第 1 组均为  $6\times 2$  个仓格, 沉箱宽度从  $7\text{ m}$  增大至  $11\text{ m}$ , 沉箱相对吃水从  $0.78$  减小至  $0.64$ 。沉箱宽度较小时, 沉箱的定倾半径较小, 自身浮游稳定性较差, 需要较大的吃水保持稳定。

2)第 2 组保持沉箱长度不变, 宽度方向增加仓格数量, 工况 1 单个仓格时相对吃水达  $0.80$ , 当工况 5 达到 5 个仓格时相对吃水  $0.45$ , 即可保证沉箱的浮游稳定。从计算数据分析, 5 种工况下沉箱及压载水的质心高度变化不大, 但沉箱定倾半径随着沉箱宽度增加有大幅提高, 因此沉箱的浮游稳定性有显著改善。

3)第 3 组采用正方形沉箱进行分析, 单个仓格沉箱的相对吃水达到  $0.89$ , 5 个仓格时相对吃水为  $0.46$ 。单个仓格代表了沉箱最不利的浮游稳定状态, 一般情况下单个仓格的沉箱不宜采用浮运安装。

4)第 4 组采用  $6\times 2$  仓格保持平面尺度不变, 高度从  $18\text{ m}$  增大至  $200\text{ m}$  时其相对吃水从  $0.70$  增大至  $0.74$ , 在沉箱平面尺度一定的情况下, 沉箱高度对浮游稳定性的影响相对小一些, 沉箱高度越小其浮游稳定性越好, 当沉箱高度增大时其相对吃水会增大, 但对应一个平面尺度其相对吃水将趋近于定值。

5)第 5 组采用  $3\times 3$  仓格保持平面尺度不变,

高度从  $18\text{ m}$  增大至  $200\text{ m}$  时其相对吃水从  $0.64$  增大至  $0.74$ 。与第 4 组结论一致, 沉箱平面尺度一定时其相对吃水随着沉箱高度的增大趋近于定值。

6)将所有计算工况下的相对吃水与沉箱宽度综合分析, 由图 3 可以看出, 沉箱宽度越大其相对吃水越小, 当沉箱宽度一定时相对吃水随沉箱高度逐渐增大; 由图 4 相对吃水与宽高比关系可以看出, 除特殊工况外, 相对吃水与宽高比成负相关关系, 其中 A 点和 B 点为沉箱高度( $200\text{ m}$ )远大于常规沉箱高度时相对吃水趋于定值的特殊工况。

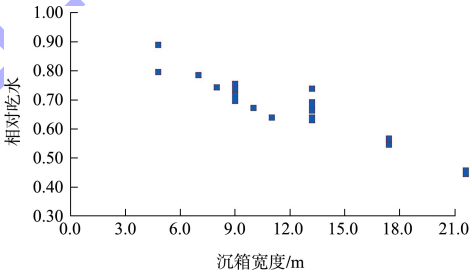


图 3 浮游稳定相对吃水与沉箱宽度关系

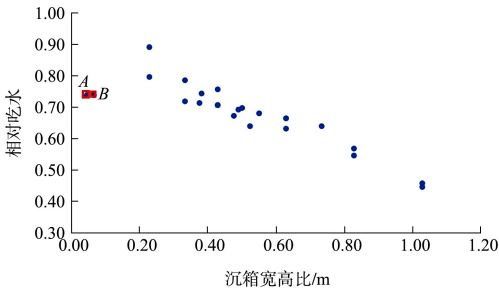


图 4 浮游稳定相对吃水与沉箱宽高比关系

3 结论

1)沉箱平面尺度越小其满足浮游稳定所需的相对吃水越大, 即浮游稳定性越差。特别是当纵横方向均只有一个仓格时, 定倾高度满足  $0.4\text{ m}$  时沉箱相对吃水在  $0.9$  左右, 不宜进行远程浮运, 宜采用吊运等其他方式进行安装。