



考虑实际约束的沉箱底板内力计算

刘海欣, 张丽珍, 覃杰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 沉箱为薄壁构件, 沉箱外壁和隔墙厚度通常小于底板厚度, 难以对底板施加有效约束, 不满足现行规范的四边固结板假设。通过采用有限元模型模拟沉箱外壁和隔墙对底板的实际约束效果, 分析沉箱底板内力分布规律, 并与四边固结板计算结果进行对比, 表明按照四边固结板计算的跨中弯矩偏小 10% 左右, 当不存在悬臂趾板时, 四边固结板计算的支座弯矩偏大 25%; 当存在悬臂趾板时, 四边固结板计算的支座弯矩偏小, 偏差程度与悬臂趾板尺度有关。相关结论对沉箱的设计具有指导意义。

关键词: 沉箱底板; 内力; 约束; 计算

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0052-05

Internal force of caisson bottom slab considering actual constraints

LIU Hai-xin, ZHANG Li-zhen, QIN-Jie

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: As a thin-walled member, the thickness of the outer wall and partition wall of a caisson is usually less than the thickness of its bottom slab. Hence, it is difficult to impose effective constraints on the bottom slab, which does not conform to the assumption of the four-edge consolidation slab in the current specification. Using the finite element model to simulate the actual constraint effect of the outer wall and partition wall of a caisson on the bottom slab, we analyze the internal force distribution of the bottom slab of the caisson and compare the calculation results with those of the four-edge consolidation slab. The results reveal that the mid-span bending moment calculated by the four-edge consolidation slab is about 10% smaller. When there is no cantilever toe plate, the bending moment of the support calculated by the four-edge consolidation slab is 25% larger. When there is a cantilever toe plate, that calculated by the four-edge consolidation slab is smaller, and the deviation degree is related to the scale of the cantilever toe plate. The relevant conclusions are of guiding significance for the design of caissons.

Keywords: bottom slab of a caisson; internal force; constraint; calculation

沉箱结构在我国码头工程建设中应用广泛。JTS 167—2018 规范^[1]中将沉箱底板作为四边固结板来计算沉箱内力, 但未给出适用条件。实际工程中的沉箱为薄壁结构, 沉箱外壁和内隔墙的厚度通常小于底板厚度, 二者抗弯刚度差异较大, 因此外壁和隔墙很难对底板实施有效的约束, 实

际内力与四边固结板差异明显。

部分学者^[2-4]从不同角度分析沉箱底板的实际内力情况, 但仍缺少规律性的总结。本文以某实际工程为例, 通过有限元算法模拟外壁和隔墙对底板的实际约束效果, 详细分析底板实际内力与四边固结板假设的差异, 并提出相关建议。

收稿日期: 2022-05-07

作者简介: 刘海欣(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口海岸工程设计及管理工作。

1 工程概况

某直立式防波堤采用方沉箱结构, 沉箱尺寸为 19.55 m × 27.30 m × 27.70 m (长 × 宽 × 高), 沉箱设前趾和后趾, 长度均为 1.50 m。沉箱四周外

壁厚 0.40 m, 内隔壁壁厚均为 0.25 m, 底板厚 0.60 m, 仓格平面尺寸为 4.50 m × 4.50 m。

沉箱内回填开山石, 上部设置盖板和挡浪墙。防波堤断面见图 1, 沉箱平面见图 2。

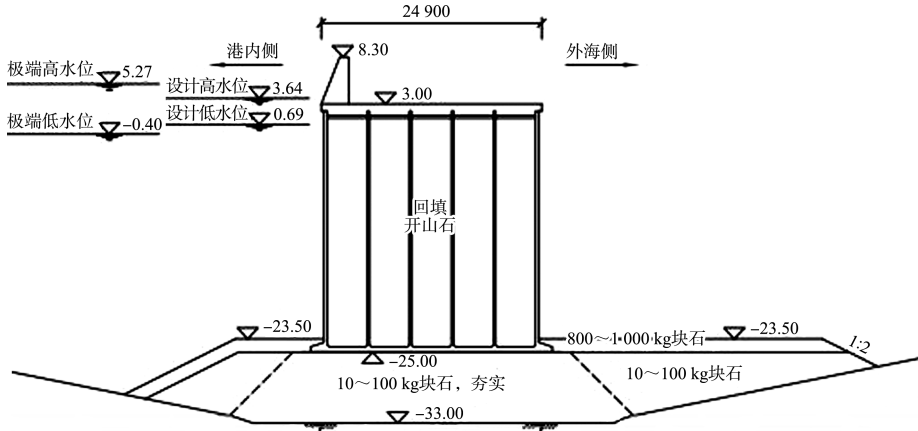


图 1 防波堤断面 (尺寸: mm; 高程: m)

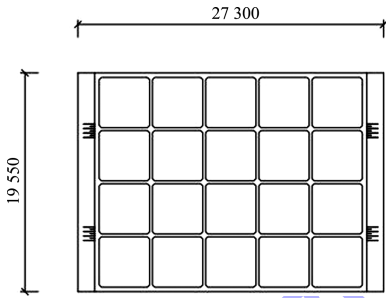


图 2 沉箱平面 (单位: mm)

波浪力为使用期沉箱承受的主要外荷载, 设计波要素见表 1。

表 1 设计波浪要素

水位	波高 $H_{1\%}/m$	波长 L/m	平均周期 T/s
设计高水位	8.16	118	9.4
设计低水位	8.00	113	9.4
极端高水位	8.23	120	9.4
极端低水位	7.93	111	9.4

根据断面波浪物理模型试验报告, 得出沉箱和挡浪墙最不利的同步波压力结果, 即极端高水位波峰作用时为最不利工况, 实测波压力和浮托力分布见图 3。

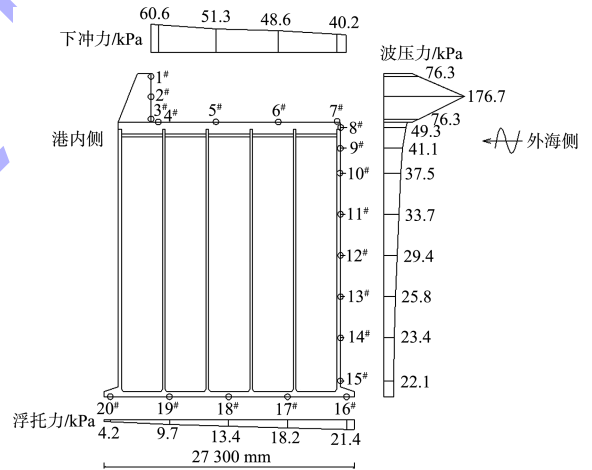


图 3 极端高水位波峰作用的波压力和浮托力分布

2 沉箱底板受力分析

沉箱顶为全封闭的盖板以及挡浪墙, 沉箱内回填开山石, 两侧均为水体。使用期在波浪和自重作用下沉箱底产生地基反力。沉箱底板承受地基反力、波浪浮托力、底板自重以及贮仓压力作用, 底板顶部受隔墙及外壁板约束。

2.1 沉箱底板内力计算模式

2.1.1 规范计算模式

规范将沉箱底板作为四边固结板计算, 板的

平面计算尺度取隔墙和外壁的中心距，即 $l_x = l_y = 4.825\text{ m}$ 。

根据实测波压力和浮托力分布，求得在波浪和结构自重作用下沉箱底的地基反力最大值为 586.00 kPa ，最小值为 0 ，呈三角形分布，地基反力作用宽度为 25.8 m 。与沉箱后趾相邻的底板仓格受力最大，插值可得底板外壁板和隔墙处的地基反力分别为 547.39 和 437.80 kPa ，见图 4。填料贮仓压力按深仓公式计算，底板处的贮仓压力为 63.12 kPa ，底板自重为 8.85 kPa 。

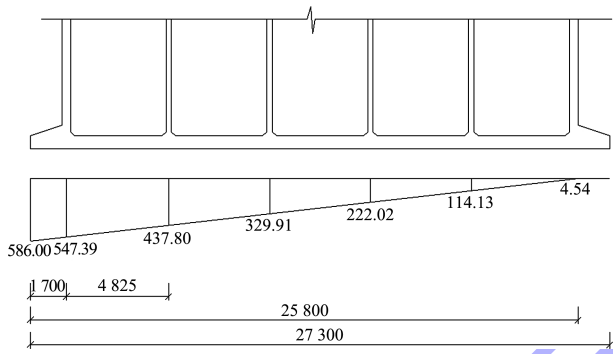


图 4 地基反力分布 (尺寸: mm; 反力: kPa)

2.1.2 有限元计算模式

规范计算模式存在以下不足: 1) 沉箱外壁和隔墙抗弯刚度小于底板抗弯刚度, 底板按四边固结计算高估外壁和隔墙对底板的约束作用; 2) 均布荷载和三角形分布荷载产生的最大弯矩在不同位置, 简单的查静力计算手册并叠加比较保守; 3) 难以准确分析底板的剪力。

为克服上述不足, 采用 MIDAS CIVIL(空间有限元分析软件)建立沉箱的有限元模型分析底板在地基反力、贮仓压力、底板自重和波浪浮托力作用下的内力。在 MIDAS CIVIL 中, 厚板单元理论考虑横向剪切应力的影响, 通常得到比薄板单元理论更为准确的结果, 本文中沉箱底板、外壁和隔墙均采用厚板单元模拟。

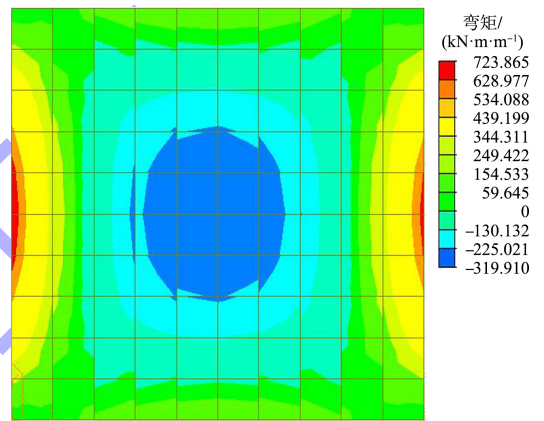
为更准确地与规范计算模式对比, 分两种模

式进行有限元分析。模式 1: 建立与后趾相邻的单个仓格底板模型, 底板四周边界条件为固结; 模式 2: 建立整个沉箱模型, 由于隔墙和外壁不是分析重点, 为节省计算资源, 建模高度取 5 m , 外壁和隔墙的顶面边界条件为固结。

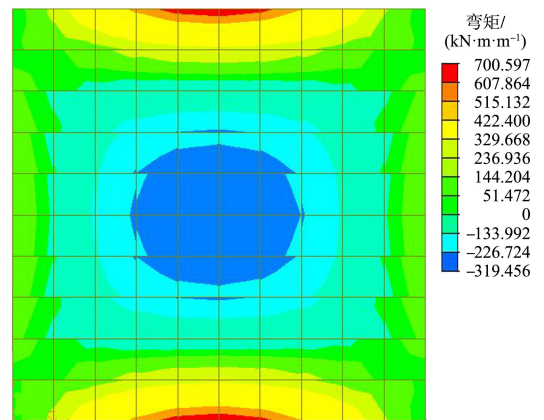
2.1.3 计算结果

地基反力和波浪浮托力分项系数分别取 1.35 和 1.40 , 贮仓压力和自重分项系数取 1.00 。

模式 1, 四边固结板在组合荷载作用下的横向和纵向弯矩分别见图 5。



a) 横向



b) 纵向

图 5 四边固结板模型弯矩

模式 2, 沉箱底板在组合荷载作用下的横向和纵向弯矩分别见图 6。

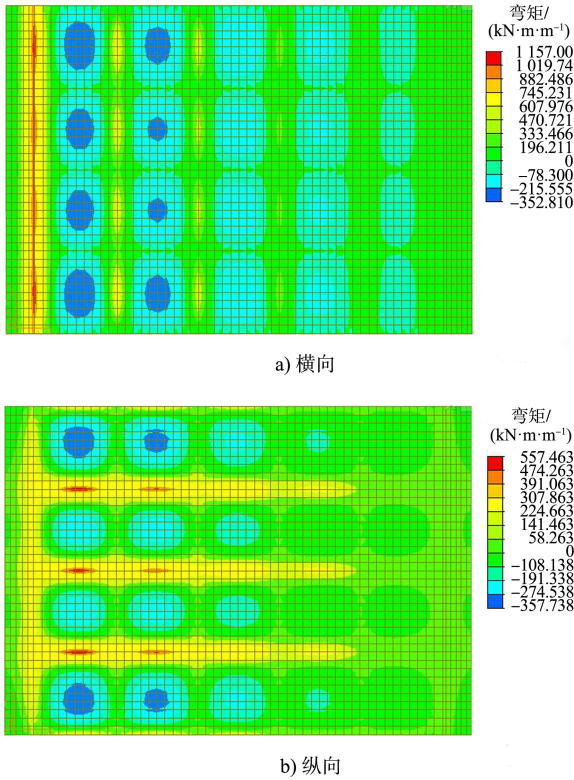


图 6 整体模型底板弯矩

规范方法计算的内力查表^[5]可得, 规范方法与模式 1、2 的计算结果对比见表 2, 同时以模式 2 整体模型的内力为基准, 表中给出规范方法和

模式 1 内力的偏差(表中内力值已四舍五入取整)。

对比分析规范方法与模式 1, 二者的内力结果总体比较接近, 相比整体模型计算的底板内力均存在较大的偏差。由于规范方法没有结构剪力数值, 以有限元模型模式 1 和 2 对比分析四边固结板假设与实际模型内力的区别。

由理论分析可知, 当支座的固结约束变弱时, 内力会由支座向跨中转移, 表现为四边固结板假设的支座弯矩比实际结构弯矩偏大, 偏于安全; 而跨中弯矩比实际结构弯矩偏小时, 偏于危险。表 3 中底板纵向内力分布规律与理论分析相吻合, 其中四边固结板假设的跨中弯矩偏小 10.70%, 支座弯矩偏大 25.68%。

表 2 中底板横向弯矩分布规律与理论分析有所差异, 其中四边固结板假设的跨中弯矩偏小 9.33%, 支座弯矩偏小 33.78%。这是由于沉箱横向存在后趾, 加强了支座的约束效果, 使横向跨中弯矩相比纵向增加幅度有所减少; 同时后趾为悬臂构件, 悬臂板支座弯矩与仓格底板支座弯矩的叠加, 使横向支座弯矩大幅增加。

表 2 沉箱底板荷载结果比较

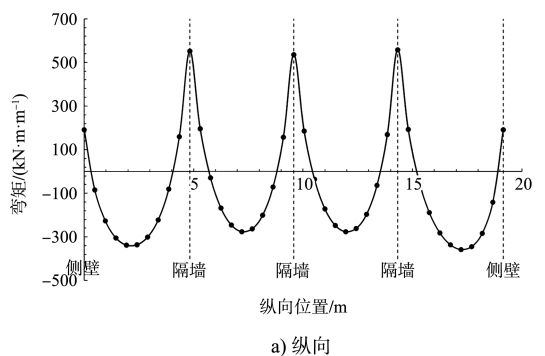
方法	横向弯矩/(kN·m·m ⁻¹)		纵向弯矩/(kN·m·m ⁻¹)		横向剪力/kN	纵向剪力/kN
	跨中	支座	跨中	支座		
规范方法	-301	743	-297	722	-	-
模式 1	-320	724	-319	701	724	701
模式 2	-353	1 093	-358	557	1 216	-807
模式 2-规范方法(偏差)/%	-14.74	-32.02	-16.88	29.55	-	-
模式 2-模式 1(偏差)/%	-9.33	-33.78	-10.70	25.68	-40.49	-13.16

底板纵向和横向均存在较大的剪力, 必须对底板进行抗剪强度验算, 规范中对沉箱底板抗剪计算的要求不高, 应该引起设计人员的注意。对比模式 1 和 2, 无论是纵向还是横向, 简单按四边固结板模型计算的剪力均偏小, 因为单个仓格的四边固结板模型忽略了后趾以及相邻仓格荷载的影响。

2.1.4 底板弯矩分布规律

为进一步研究沉箱底板纵向和横向弯矩分布规律, 在模式 2 整体模型中沿第 1 个仓格中间部

位做纵向剖面, 同时沿各仓格中间部位做横向剖面, 沉箱底板纵向和横向弯矩分布见图 7。



a) 纵向

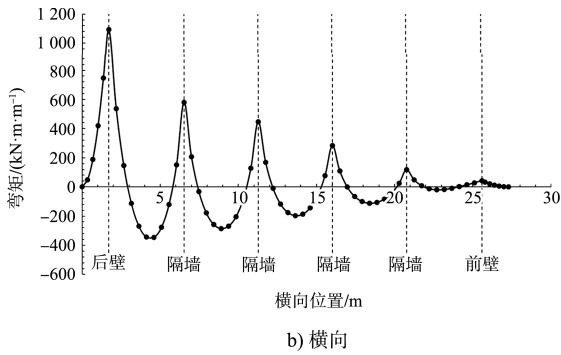


图 7 弯矩剖面

本例中，沉箱侧壁比隔墙厚度大，侧壁对底板的约束强于隔墙，但图 7a) 中支座最大弯矩位于隔墙处，再次说明相邻仓格底板的存在不仅加强支座的约束效果，而且相邻仓格内的荷载进一步影响内力的分布。

图 7b) 可见，由于沉箱底板横向荷载不均匀，导致横向各仓格内力差异很大，在第 3 个仓格处的内力已减少为第 1 个仓格的 55% 左右。当沉箱所受荷载具有显著的不均匀性时，根据实际内力分布优化结构配筋，将带来可观的经济效益。

2.2 底板厚度对内力的影响

分别将沉箱整体模型中的底板厚度改为 0.2、0.4、0.8 m，其他参数不变，并分别计算与四边固结板模型的内力比值，见图 8。

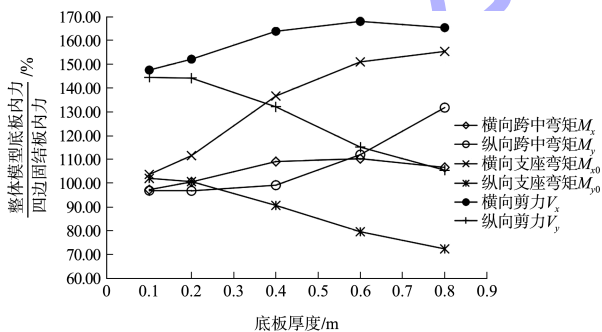


图 8 不同厚度的整体模型底板内力与四边固结板内力的比值

底板厚度越大，侧壁和隔墙对底板的相对刚度越小，约束效果越弱，计算结果与四边固结板模型偏差越大，表现为跨中弯矩随底板厚度的增加而增加，支座弯矩随底板厚度的增加而减小，支座剪力随底板厚度的增加而减小。上述规律在纵向跨中弯矩 M_y 、支座弯矩 M_{y0} 和支座剪力 V_y 中符合性很好。

横向跨中弯矩 M_x 、支座弯矩 M_{x0} 和支座剪力 V_x 随底板厚度的分布规律相对复杂。当底板厚度不超过 0.6 m 时，横向跨中弯矩 M_x 、支座剪力 V_x 随底板厚度的增加而先增加；底板厚度大于 0.6 m 时，横向跨中弯矩 M_x 、支座剪力 V_x 随底板厚度的增加略有减小；横向支座弯矩 M_{x0} 随底板厚度的增加持续增加。这可能因为在沉箱横向存在悬臂后趾，不仅加强了支座的约束效果，同时后趾范围的荷载影响了相邻仓格内力分布。

工程中的沉箱底板厚度通常为 0.5 ~ 0.7 m，由图 8 可见在此范围内底板厚度对横向内力的影响很小，对纵向内力的影响相对较大。

虽然纵向剪力 V_y 和横向剪力 V_x 随底板厚度的变化趋势不同，但均大于四边固结模型的剪力，特别是横向剪力 V_x ，是四边固结模型剪力的 1.5 倍以上。

2.3 仓格数量对底板内力的影响

通常沉箱底板荷载呈满布，相邻仓格及相邻仓格的荷载对底板内力影响显著。类似于连续梁，相邻跨的荷载会减少跨中弯矩，同时增加支座弯矩，相当于加强了支座的约束效果，使实际内力分布更趋近于四边固结板内力。由表 2 可见，按四边固结板计算的跨中内力偏小 10% 左右，对工程偏于危险。

受限于工程规模或施工能力，当沉箱某方向只有一个仓格时，底板的实际内力与四边固结板的偏差将进一步增大。对于常见的沉箱尺度，计算表明按四边固结板计算的跨中和支座弯矩偏差可达 50% 以上，规范中未提及，应引起重视。

3 结论

1) 工程中常见的沉箱为薄壁结构，底板抗弯刚度通常大于外壁和隔墙，外壁和隔墙对底板的约束不足，简单按四边固结板计算底板内力，其误差较大。对于常规的沉箱尺度，四边固结板计算的跨中内力偏小 10% 左右；当存在趾板时，支座弯矩也偏小，其程度受趾板尺度影响；当不存在趾板时，支座弯矩偏大 25% 左右。