



沉箱外壁和隔墙内力计算优化

刘海欣，王勇健，张丽珍

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510230)

摘要：现行规范对于沉箱构件内力计算进行简化，忽略上部结构对构件的约束。将考虑沉箱上部结构对构件施加有效约束时的横向跨中弯矩和支座弯矩结果与规范计算模式结果进行对比分析，并比较不同计算模式下的构件顶部 $1.5l$ 内 (l 为仓格间距) 和构件底部 $1.5l$ 内的内力。结果表明，当考虑沉箱上部结构对构件施加有效约束时，沉箱构件上部的横向跨中弯矩可减少约 36%，支座弯矩可减少约 14%，可显著优化结构设计，同时须核算构件竖向强度。虽然结构约束条件与底部相似，但由于荷载分布不同，构件顶部不适合采用三边固接一边简支模型计算内力；沉箱构件内力分布不均匀，边缘仓格的内力远大于中间仓格的内力，弯矩增加超过 30%，对于仓格少于或等于 2 个的小型沉箱设计时尤其值得注意，此时建议建立整体模型进行分析计算。

关键词：沉箱；构件内力；约束；计算

中图分类号：U656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)05-0055-06

Internal force calculation optimization of caisson outer wall and partition wall

LIU Haixin, WANG Yongjian, ZHANG Lizhen

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

Abstract: The current code simplifies the internal force calculation of caisson members, ignoring the constraints of the superstructure on the members. We carry out the comparative analysis of transverse mid-span bending moment and support bending moment results by considering the effective constraints of the superstructure on the members with results of code calculation pattern, and compare the internal forces within $1.5l$ at the top of the member and $1.5l$ at the bottom of the member under different calculation patterns. The results show that when the upper structure of the caisson imposes effective constraints on the members, the transverse mid-span bending moment of the upper part of the caisson member can be reduced by about 36%, and the support bending moment can be reduced by about 14%, which can significantly optimize the structural design. At the same time, it is necessary to calculate the vertical strength of the members. Although the structural constraint conditions are similar to those at the bottom, due to the different load distribution, the top of the member is not suitable for calculating the internal force by using the three-side consolidation and one-side simply supported model. The internal force distribution of caisson members is uneven. The internal force of the edge compartment is much larger than that of the middle compartment, and the bending moment increases by more than 30%. It is particularly noteworthy for the design of small caissons with less than or equal to 2 compartments. In this condition, it is recommended to establish an overall model for calculation.

Keywords: caisson; internal force; restraint; calculation

应用于码头工程的沉箱外壁板和隔墙厚度有限，当沉箱顶设置有远大于外壁板和隔墙厚度的大体积胸墙或者封顶盖板，并通过钢筋进行连接

时，可以认为上部结构对沉箱外壁和隔墙的顶部进行有效约束。现行的 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[1]（简称“规范”）对于沉箱外壁和隔墙

收稿日期：2023-09-15

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。

的计算模式进行简化，忽略了沉箱上部结构对外壁和隔墙的约束作用，对计算模式适用条件缺少说明，而计算结果与计算模式息息相关。计算模式的选择不仅要考虑到结构约束条件，还要结合荷载分布条件进行综合分析才可合理确定。肖仕宝等^[2]考虑了顶部固接对沉箱外壁和隔墙内力的影响；陈际丰等^[3]考虑了沉箱构件中实际存在的拉弯组合内力对配筋的影响；邹艳春等^[4]通过分析表明，考虑封层盖板作用可有效减少圆沉箱构件内力。本文以前壁板为例，详细分析不同计算模式对沉箱内力的影响，并对适用条件进行阐述，

指出设计中值得注意的问题。

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，内隔墙壁厚均为 0.25 m，底板厚 0.60 m，仓格平面边长均为 4.50 m。

沉箱内回填开山石，上部设置盖板和挡浪墙，盖板顶高程 3.0 m，底高程 1.7 m，厚 1.3 m，嵌入沉箱结构深度 0.5 m。防波堤断面见图 1。

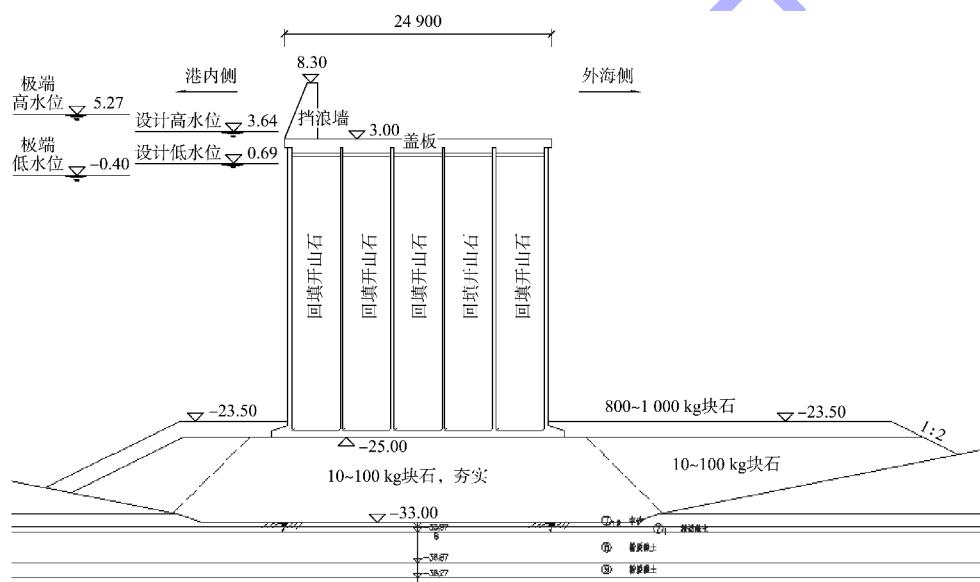


图 1 防波堤断面 (尺寸: mm; 高程: m)

2 沉箱前壁板受力分析

2.1 基本参数

沉箱前壁板承受波浪荷载和沉箱内填开山石产生的贮仓压力作用，前壁板顶部和底部分别受到盖板和底板的约束，两侧受到侧壁板的约束，中间受到横隔墙的加强作用，减少了受力跨度。

根据断面波浪物理模型试验报告，设计低水位时波吸力最大，波高 $H_{1\%}$ 为 8 m，波长 L 为 113 m，平均周期 T 为 9.4 s。为方便建模，波吸力峰值上下均简化为直线分布。回填开山石参数：内摩擦角 $\varphi=40^\circ$ ，外摩擦角 $\delta=26.7^\circ$ ，浮密度 $\rho'=1000 \text{ kg/m}^3$ 。实测波吸力和计算贮仓压力如图 2 所示，其中 l 为仓格间距(隔墙间距)。

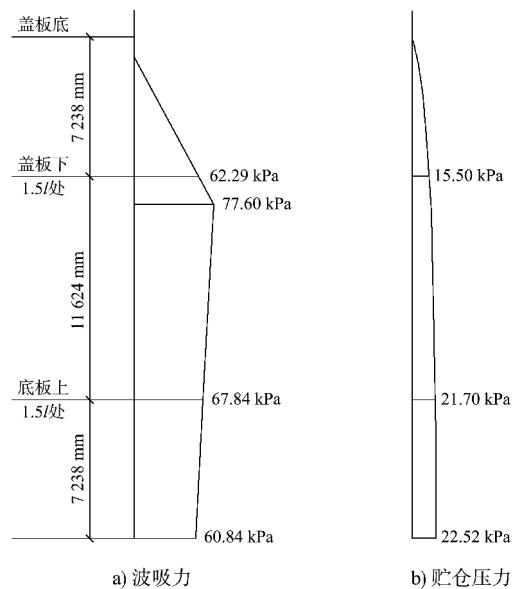


图 2 设计低水位实测波吸力和计算贮仓压力

2.2 前壁板内力计算模式

2.2.1 规范计算模式

1) 底板以上 1.5 倍隔墙间距区段, 按三边固定一边简支板计算。

2) 1.5 倍隔墙间距以上区段, 多余两跨时按两端固定的连续板计算。

前壁板的计算尺寸取隔墙和外壁的中心距, 即 $l = 4.825 \text{ m}$, $1.5l = 7.238 \text{ m}$ 。两端固定连续板的跨中和支座弯矩分别取 $ql^2/16$ 和 $ql^2/11^{[5]}$, 其中 q 为计算跨度上的均布荷载。

2.2.2 改进计算模式

规范计算模式存在以下不足: 为便于设计人员使用, 规范计算模式对沉箱结构内力计算进行了一定简化, 对于 1.5 倍隔墙间距以上区段的规定偏粗糙, 没有考虑沉箱上部结构对构件的约束作用。沉箱上部结构嵌入沉箱内部 0.5 m, 并且有钢筋连接, 上部结构的尺寸远大于沉箱构件的厚度, 可以认为沉箱构件的上部为固接。

为准确分析前壁板顶部和底部内力差异, 提出 3 种改进计算模式进行分析: 1) 模式 1, 建立沉箱前壁板盖板以下 $1.5l$ 隔墙间距区段模型, 按三边固定一边简支板计算; 2) 模式 2, 建立 1 个隔墙间距内的前壁板模型, 高度从底板顶到盖板底, 按四边固定计算; 3) 模式 3, 建立整个前壁板、隔墙和侧壁模型。沉箱不同构件的几何尺寸和抗弯刚度差异大, 借鉴构件计算中考虑实际约束的处理方法^[6], 建立整体模型可以比较准确地模拟结构连接处的约束效应。为节省计算资源, 同时避免模型边界对结果的影响, 建模范围取到前壁板后第 1 道纵隔墙的后方, 模型顶部和底部以及横隔墙、侧壁后部边界条件为固接。

规范计算模式和改进计算模式 1、2 见图 3, 改进计算模式 3 的有限元模型见图 4。

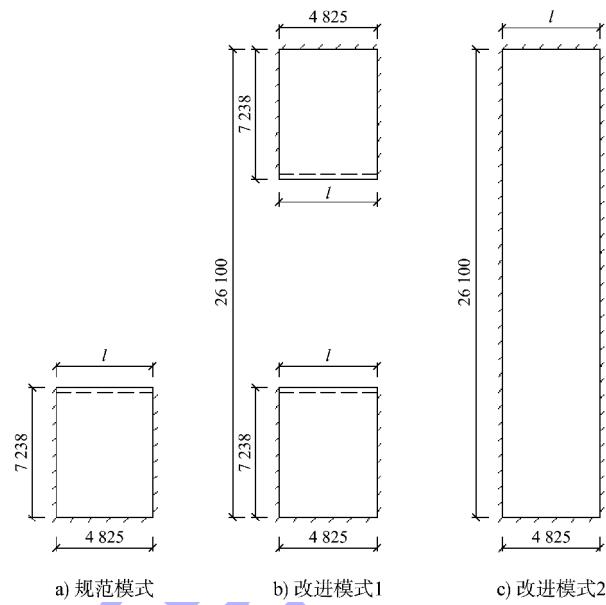


图 3 规范计算模式与改进计算模式 1、2 (单位: mm)

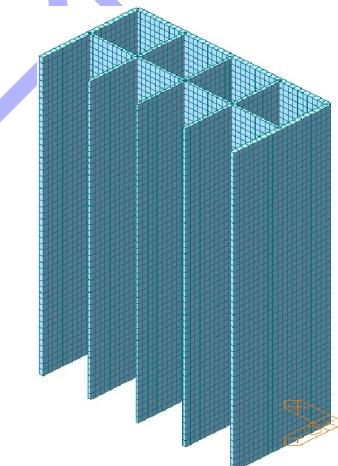


图 4 改进计算模式 3 的有限元模型

2.3 前壁板内力计算结果

采用空间有限元分析软件 Midas Civil 对规范计算模式和改进计算模式 1~3 分别建立有限元模型进行分析。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, 本文中沉箱前壁板、隔墙均采用厚板单元模拟。波吸力和贮仓压力分项系数分别取 1.50 和 1.35。

2.3.1 三边固接一边简支与四边固接板内力对比分析

规范计算模式和改进计算模式 1、2 的内力结果见表 1(表中内力值已四舍五入取整)，其中改

进计算模式 2 中，将前壁板分为底板以上 $1.5l$ 以内、中间、盖板以下 $1.5l$ 以内 3 个区域分别提取内力，以便与规范计算模式及改进计算模式 1 进行对比。

表 1 三边固接一边简支与四边固接板内力计算结果对比

模式	范围	横向弯矩 $M_x/(kN\cdot m\cdot m^{-1})$		竖向弯矩 $M_y/(kN\cdot m\cdot m^{-1})$		横向剪力 V_x/kN	竖向剪力 V_y/kN
		跨中	支座	跨中	支座		
规范模式	底板上 $1.5l$ 以内	-117	234	-66	163	283	218
	底板 $1.5l$ 以外	-212	308	-	-	351	-
改进模式 1	盖板下 $1.5l$ 以内	-59	121	-49	28	160	25
	底板上 $1.5l$ 以内	-130 (↑11.06%)	252 (↑7.91%)	-50 (↓24.57%)	162 (↓0.71%)	285 (↑0.87%)	216 (↓0.61%)
改进模式 2	中间区域	-136 (↓36.07%)	263 (↓14.55%)	-34	53	300 (↓14.70%)	11
	盖板下 $1.5l$ 以内	-111 (↑89.58%)	216 (↑78.37%)	-29 (↓41.33%)	43 (↑51.83%)	247 (↑54.22%)	24 (↓4.47%)

1) 对于底板上 $1.5l$ 范围内，与规范计算模式相比，按四边固接板计算的内力，除竖向跨中弯矩偏差较大以外，其他各弯矩和剪力偏差基本上在 11% 以内，考虑到沉箱通常设有加强角等构造措施，规范计算模式仍然适用，计算精度可以满足工程需要。四边固接板竖向跨中弯矩相比规范计算模式减少 24.57%，规范计算模式偏于保守，对工程是安全的。

2) 对于中间区域，规范计算模式按两端固定的连续板计算的内力普遍偏大，四边固接板横向跨中弯矩相比规范计算模式减少 36.07%、支座弯矩减少 14.55%、横向剪力减少 14.70%。中间区域在构件中占比较大，按四边固接板计算可显著优化结构设计。

3) 对于盖板下 $1.5l$ 范围内，对比改进计算模式 1 和 2 可知，按三边固接一边简支计算的内力存在严重偏差，反映出这种计算模式不适用。盖板下 $1.5l$ 范围和底板以上 $1.5l$ 范围，结构边界和构造措施是相似的，之所以计算结果相差甚远，由图 3 可知是因为波吸力在水位附近变化比较陡峭，从上向下是急剧增加的，而盖板下 $1.5l$ 范围尚未涵盖最大波吸力，忽略了较大波吸力的作用导致计算结果严重失真。说明合理的计算模式需要综合考虑结构约束条件和荷载分布条件确定。对比规范计算模式与改进计算模式 2 可知，规范

计算模式在此区域忽略了竖向内力，按两端固定的连续板计算的横向内力偏大，按四边固接板计算可显著优化结构设计。

2.3.2 四边固接板与整体模型内力对比分析

改进计算模式 2 建立的四边固接板仍然是一种理想的边界条件假设，为进一步分析前壁板内力，按改进计算模式 3 建立整体模型，前壁板被横隔墙分成了 2 个侧边仓位和 2 个中间仓位。前壁板四边固接板内力与整体模型内力云图分别见图 5、6，内力对比见表 2。

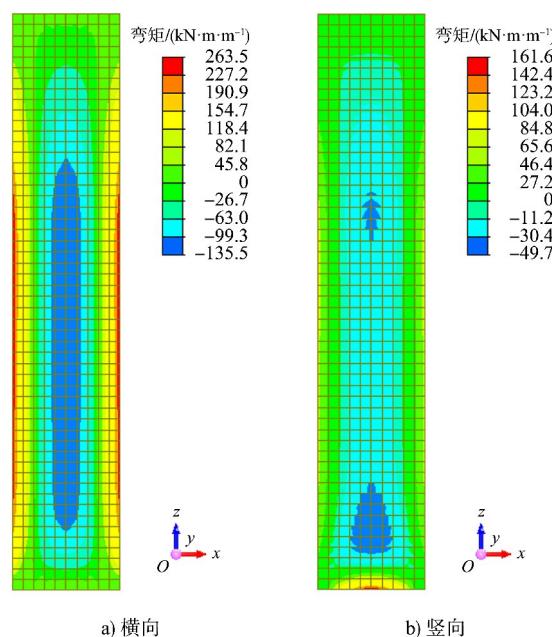


图 5 前壁板四边固接板模型弯矩分布

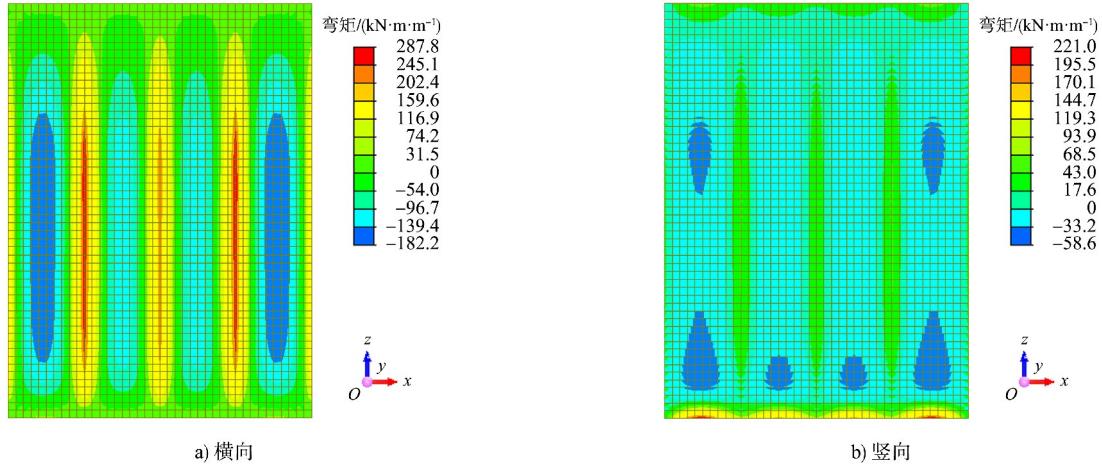


图 6 前壁板整体模型弯矩分布

表 2 四边固接板与整体模型内力计算结果对比

模式	范围	横向弯矩 $M_x/(kN \cdot m \cdot m^{-1})$		竖向弯矩 $M_y/(kN \cdot m \cdot m^{-1})$		横向剪力 V_x/kN	竖向剪力 V_y/kN
		跨中	支座	跨中	支座		
改进计算 模式 2	底板上 $1.5l$ 以内	-130	252	-50	162	285	216
	中间区域	-136	263	-34	53	300	11
	盖板下 $1.5l$ 以内	-111	216	-29	43	247	24
改进计算模式 3 (中间仓格)	底板上 $1.5l$ 以内	-120 (↓ 7.91%)	270 (↑ 7.12%)	-49 (↓ 2.19%)	182 (↑ 12.79%)	289 (↑ 1.53%)	222 (↑ 2.75%)
	中间区域	-125 (↓ 8.10%)	282 (↑ 6.86%)	-30 (↓ 12.18%)	46 (↓ 12.66%)	304 (↑ 1.28%)	18 (↑ 63.95%)
	盖板下 $1.5l$ 以内	-102 (↓ 7.90%)	230 (↑ 6.76%)	-25 (↓ 13.33%)	41 (↓ 4.14%)	250 (↑ 1.27%)	33 (↑ 36.12%)
改进计算模式 3 (侧边仓格)	底板上 $1.5l$ 以内	-174 (↑ 34.25%)	276 (↑ 9.58%)	-59 (↑ 18.06%)	221 (↑ 36.71%)	314 (↑ 10.14%)	257 (↑ 18.91%)
	中间区域	-182 (↑ 34.41%)	288 (↑ 9.23%)	-42 (↑ 22.07%)	47 (↓ 10.68%)	329 (↑ 9.73%)	64 (↑ 482.15%)
	盖板下 $1.5l$ 以内	-147 (↑ 32.41%)	235 (↑ 9.12%)	-35 (↑ 23.45%)	53 (↑ 21.89%)	270 (↑ 9.36%)	93 (↑ 284.69%)

1) 前壁板中间仓格。相比四边固接板模型, 对于横向弯矩, 所有区域均表现出整体模型的支座弯矩增加、跨中弯矩减少, 总体上偏差幅度不大, 这是由相邻仓格的荷载引起的; 对于竖向弯矩, 值得注意的是整体模型的底部支座弯矩增加了 12.79%, 其他各处竖向弯矩均有所减少; 对于横向剪力, 整体模型结果与四边固接板模型非常接近; 对于竖向剪力, 整体模型结果显著增大, 最大幅度达 63.95%, 但竖向剪力总体不大, 对设计影响有限。由竖向弯矩和竖向剪力的对比结果可知, 前壁板整体比较大, 隔墙厚度导致的实际约束效果以及相邻仓格分布的荷载都会引起内力重分布, 简单作为四边固接板计算时竖向内力存在较大偏差。

2) 前壁板侧边仓格。相比四边固接板模型, 对于横向弯矩, 所有区域均表现出整体模型的支座弯矩增加, 增加幅度在 10% 以内, 跨中弯矩显著增加, 最大幅度达 34.41%。这是因为侧壁板与前壁板厚度相当, 抗弯刚度相当, 侧壁板对前壁板的约束效果达不到固接的程度, 导致内力向跨中分布, 而支座弯矩增加, 是因为最大支座弯矩位于侧边仓格的横隔墙处, 是受到相邻仓格的荷载引起的; 对于竖向弯矩, 整体模型结果除了中间区域的支座弯矩减少 10.68%, 其他各处弯矩均显著增加, 最大幅度达 36.71%; 对于横向剪力, 整体模型结果总体上是增加的, 并且增加幅度比较接近, 均为 10% 左右; 对于竖向剪力, 整体模

型结果显著增大，最大幅度达 482.15%。

3) 整体模型内力分布。为进一步研究前壁板弯矩在不同仓位的分布规律，沿前壁板纵向截取 3 条剖面线，分别位于底板以上 1.5l 处、竖向中间位置、盖板下 1.5l 处，弯矩分布见图 7a); 沿前壁板竖向截取 2 条剖面线，分别位于中间仓位和侧边仓位的中间，弯矩分布见图 7b)。

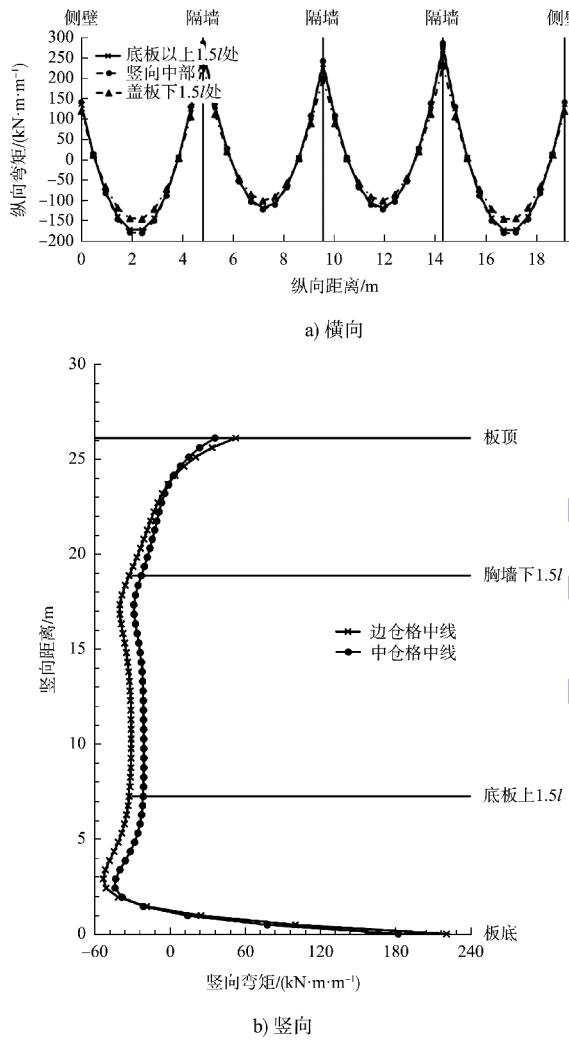


图 7 前壁板弯矩分布

图 7 直观表明，前壁板内力在不同仓位的分布很不均匀，相邻仓位和荷载分布均会影响支座的实际约束效果，从而引起内力的重分布，侧边仓位内力总体上比中间仓位内力高出不少。

进一步分析可知，对于工程中常见的小型沉箱，当仓位少于或等于 2 个时，外壁均属于侧边仓位，外壁内力与规范计算模式的结果存在较大差异，规范对此缺少说明，这应该引起设计重视。

3 结论

1) 沉箱外壁和隔墙内力计算模式不仅应考虑结构约束条件，还须考虑荷载分布。对于常规的沉箱结构，承受波浪荷载的外壁，上部结构以下 1.5 倍隔墙间距区段不适合采用三边固接一边简支进行计算。

2) 对于沉箱外壁和隔墙底板上 1.5 倍隔墙间距以上区段，规范计算模式按两端固定连续板计算，竖向通常按构造配筋。当上部结构可以对构件顶部进行有效约束时，横向跨中弯矩可减少 36.07%，横向支座弯矩可减少 14.55%，并须核算竖向强度，总体上可显著优化构件设计。

3) 沉箱外壁在不同仓位的内力分布很不均匀，边缘仓位内力显著增大，横向和竖向弯矩均比中间仓位增加超过 30%，竖向剪力增加幅度更大，应特别注意对边缘仓位进行加强。

4) 对于小型码头和小型沉箱，当沉箱高度比较小时，底板以上 1.5 倍隔墙间距也可能会受到较大波浪作用，由于荷载分布形状改变，此时采用三边固接一边简支计算可能会带来较大偏差。同时当沉箱仓位少于 2 个时，外壁内力建议建立整体模型进行分析计算，尤其值得注意。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 肖仕宝, 闫乃凌, 覃兆海. 与胸墙连接的沉箱外墙及隔墙内力计算模式探讨[J]. 港工技术, 2009, 46(2): 27-29.
- [3] 陈际丰, 刘国宝, 芦志强, 等. 关于方沉箱构件内力计算的建议[J]. 水运工程, 2010(1): 47-49.
- [4] 邹艳春, 王炜正. 封仓盖板对圆沉箱内力的影响分析[J]. 水道港口, 2015, 36(4): 359-361.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册(中册)[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [6] 刘海欣, 张丽珍, 覃杰. 考虑实际约束的沉箱底板内力计算[J]. 水运工程, 2023(1): 52-56, 81.

(本文编辑 王璁)