



T 形地连墙码头结构计算

唐军军, 尹 涛, 李荣庆

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对 T 形地连墙结构受力影响因素复杂的问题, 结合工程实例, 利用 STAAD 软件采用竖向弹性地基梁法对码头结构进行分析。研究不同模型单元划分精度、地连墙入土深度以及回填料 m 值选取对地连墙结构内力的影响, 结果表明: 随模型单元划分精度的提高, 地连墙结构海侧弯矩增大, 陆侧弯矩减小, 锚碇墙结构弯矩变化规律与之相反, 最终两者内力趋于稳定; 在踢脚稳定的前提下, 随地连墙底端入土深度的增加, 墙体结构海侧弯矩减小、陆侧弯矩增大、位移减小; 随 m 取值变大, 锚碇墙海侧弯矩增大、陆侧弯矩减小, 且敏感度较高。研究结论可为 T 形地连墙码头结构的设计提供参考。

关键词: T 形地下连续墙; 竖向弹性地基梁法; 分段 m 法; STAAD

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0050-06

Calculation of wharf structure using T-type underground continuous wall

TANG Junjun, YIN Tao, LI Rongqing

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

Abstract: Regarding the complicated factors affecting the force of T-type underground continuous wall structure, this paper analyzes the wharf structure by using the vertical elastic foundation beam method and STAAD software combined with engineering examples, and investigates the influence of different model unit division accuracy, depth of the ground wall and m value of the backfill on the structure of the T-type underground continuous wall. The results show that with the improvement of model element division accuracy, the bending moment of the underground continuous wall increases at sea side, decreases at land side, and the bending moment of the anchor wall structure changes in a contrary way. Finally, the internal forces of both structures tend to be stable. Under the premise of overturning stability, the sea side bending moment of the underground continuous wall decreases, the land side bending moment increases, and the displacement decreases as the depth of the bottom of the wall increases. With the increase of m value, the bending moment on the sea side of the anchor wall increases, decreases at land side, and the sensitivity is higher. The research conclusions can provide references for the design of wharf structure using T-type underground continuous wall.

Keywords: T-type underground continuous wall; vertical elastic foundation beam method; segmentation m method; STAAD

板桩码头由前墙、锚碇结构及拉杆等组成。板桩码头具有结构简单、施工便利等优点, 被广泛采用。随着码头大型化的发展, 前沿水深逐渐增大, 板桩码头前墙所受土体荷载相应增大, 遮

帘式板桩结构通过在前墙后方增加遮帘桩来减小后方土体对前墙的作用。T 形地连墙码头结构可以省去遮帘桩, 结构简单、节省投资, 已成功应用于码头工程^[1]。

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 唐军军 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口水工结构设计工作。

本文通过自编 FORTRAN 程序计算码头前墙及锚碇结构所受土压力、波浪力、剩余水压力等外力, 并输出 STAAD 有限元建模计算命令流。通过命令流在 STAAD 软件中建立前墙、拉杆、锚碇结构整体模型, 对码头结构进行计算分析。首先, 对比不同计算模型单元划分长度码头结构计算结果, 确定合理的建模精度; 其次, 研究 T 形地连墙入土深度对码头结构受力的影响, 结合踢脚稳定计算结果, 对入土深度的确定给出建议; 最后, 分析回填料的 m 值选取^[2]对码头

结构受力的影响, 并对 m 值的选取给出建议, 旨在为 T 形地连墙码头结构的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 结构方案

某在建工程建设 2 个 5 万吨级多用途泊位(水工结构按照 7 万 t 设计), 码头长 600 m, 顶面高程 4.5 m, 前沿停泊水域底高程 -13.5 m, 码头断面见图 1。

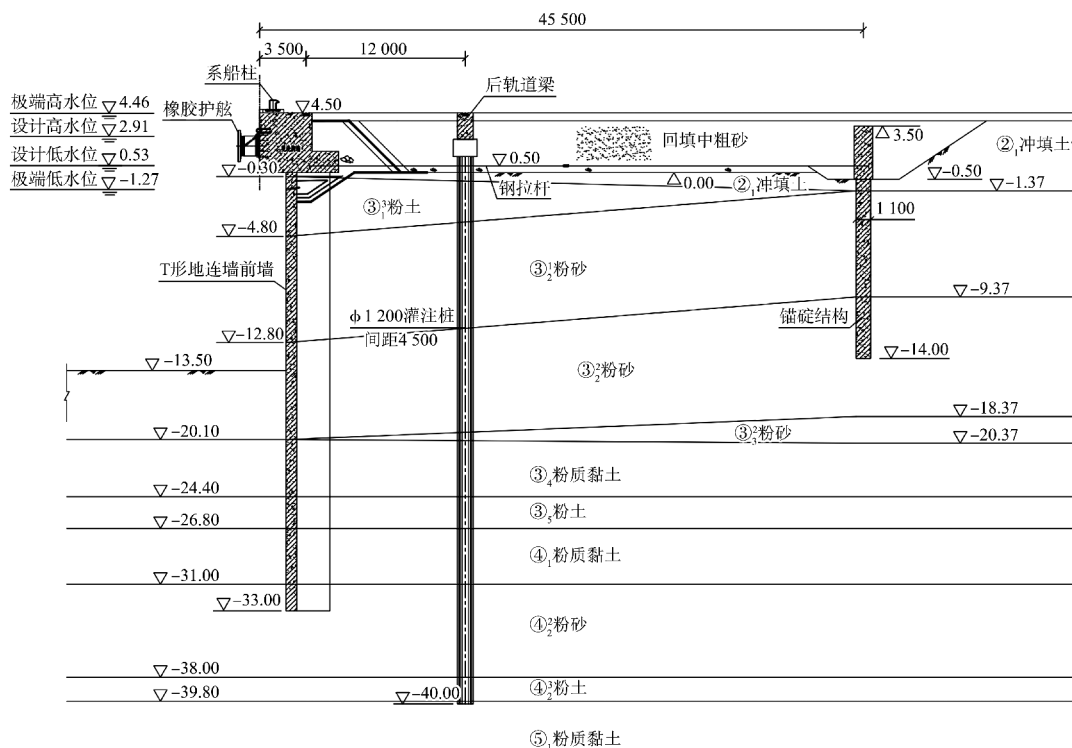


图1 码头断面 (高程: m; 尺寸: mm)

码头主体采用单锚板桩结构, 前墙采用 T 形地下连续墙结构, 地连墙尺寸见图 2, 前墙底高程为 -33.0 m。码头后方设锚碇结构, 由锚碇板和帽梁组成, 锚碇板底高程为 -14.0 m。前墙与锚碇结构中间通过钢拉杆进行连接, 拉杆高程 0.5 m、直径 85 mm、平均间距 1.5 m。钢拉杆上方回填中粗砂形成陆域。码头顶面设置 2 根门机轨道, 前轨道梁与胸墙整体浇筑, 后轨位于后轨道梁上, 后轨道梁下部采用灌注桩基础。

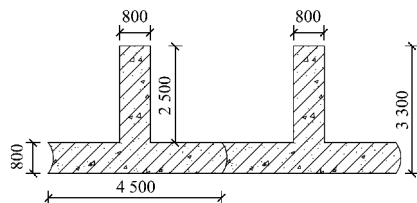


图2 T形地连墙截面 (单位: mm)

1.2 码头面荷载

1) 码头前沿 17 m 范围内均布荷载 30 kPa, 17 m 至后方陆域堆场堆货荷载 60 kPa。

2) 每个门机 4 个支腿, 每个支腿 8 个轮, 轮距 0.85 m, 最大垂直轮压 500 kN/轮, 平行于轨道最大力 50 kN/轮。

1.3 波浪条件

码头前沿设计波浪要素见表 1。

表 1 码头前沿设计波浪要素

水位	$H_{1\%}/\text{m}$	\bar{T}/s
极端高水位	2.25	8.1
设计高水位	2.04	8.1
设计低水位	1.80	8.1

注: $H_{1\%}$ 为波高, \bar{T} 为波浪周期。

1.4 地质条件

根据地勘报告, 前墙及锚碇结构位置土体参数分别见表 2、3。

表 2 前墙位置土层参数

土层编号	土层名称	土层底高程/m	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	$m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
-	回填砂	0.5	-	28.0	6.000*
② ₁	冲填土	-0.3	12.5	27.8	2.500
③ ₁ ³	粉土	-4.8	9.0	27.2	2.000
③ ₂ ¹	粉砂	-12.8	-	26.5	3.500
③ ₂ ²	粉砂	-20.1	-	26.9	4.000
③ ₄	粉质黏土	-24.4	17.7	10.3	4.000
③ ₅	粉土	-26.8	12.3	26.8	5.500
④ ₁	粉质黏土	-31.0	23.8	11.9	5.000
④ ₂ ²	粉砂	-38.0	-	26.7	6.000
④ ₂ ³	粉土	-39.0	12.8	28.1	5.500
⑤ ₁	粉质黏土	-45.3	22.8	12.6	4.200

注: * 为码头结构规范中选取的经验值。

表 3 锚碇结构位置土层参数

土层编号	土层名称	土层底高程/m	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	$m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
-	回填砂	0.50	-	28.0	6.000*
② ₁	冲填土	-1.37	12.5	27.8	2.500
③ ₁ ¹	粉砂	-9.37	-	26.5	3.500
③ ₂ ²	粉砂	-18.37	-	26.9	4.000

2 计算模型建立

将上述波浪要素、土层参数等作为输入条件, 依据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[3] 和 JTS145—2015《港口与航道水文规范》^[4] 中的相关规定, 编程计算 T 形地连墙及锚碇结构所受土压力、波浪力、剩余水压力等荷载, 进一步分析码

头前墙及锚碇结构的稳定性。

根据码头结构规范中板桩码头竖向弹性地基梁法计算, 通过自编 FORTRAN 程序将波浪要素、土层参数等作为输入条件, 依据相关规定, 计算 T 形地连墙及锚碇结构所受土压力、波浪力和剩余水压力等荷载。船舶系缆力和撞击力根据胸墙分段长度均分至下部单片 T 形地连墙结构上, 并乘以不均匀系数, 作为集中荷载加到计算模型中。同时, 根据输入的码头结构参数、建模节点间距等参数, 输出包括节点、单元、材料截面、支座等信息的 STAAD 有限元建模计算命令流。将命令流输入到 STAAD 软件中, 形成整体计算模型并进行码头结构的计算分析, 见图 3。

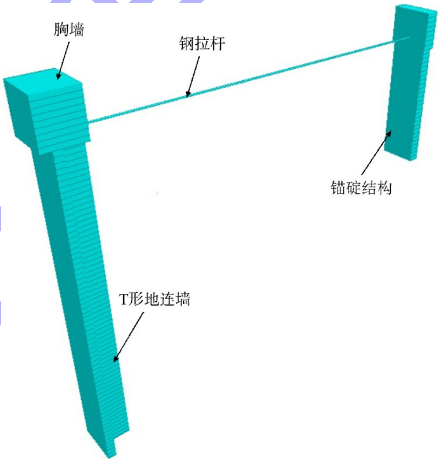


图 3 码头整体 STAAD 计算模型

在计算模型建立过程中, 将 1 片 T 形地连墙作为 1 个结构段(4.5 m 宽)进行整体建模计算。T 形地连墙截面刚度较大, 采用竖向弹性地基梁法对结构进行计算。水平地基抗力系数采用分段 m 法确定, 见图 4, 在模型支座参数设置中考虑土体屈服对计算的影响, 当土体位移超过塑性变形时, 土体提供的水平地基抗力系数近似为 0。

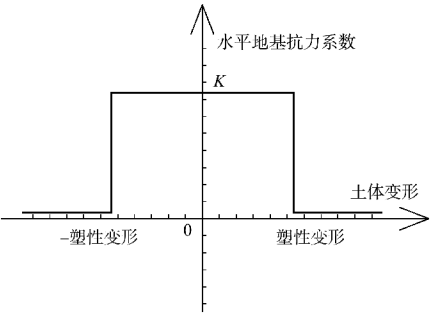


图 4 水平地基抗力系数

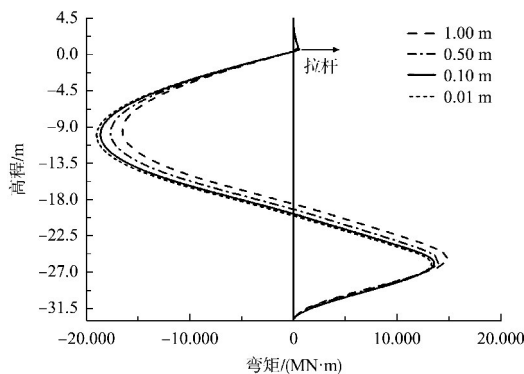
3 计算结果分析

为了便于研究码头结构不同情况下的受力性能,选取承载能力极限状态下极端低水位作为分析工况,主要作用组合为自重力+填料土压力+均载土压力+波吸力+剩余水压力。进行单元划分长度、T 形地连墙入土深度及回填料 m 值对码头结构内力和位移的敏感性分析。

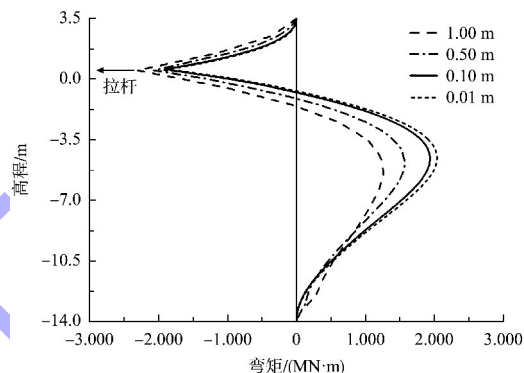
3.1 单元划分长度对结构内力和位移的敏感性分析

有限元建模计算单元划分 1.00、0.50、0.10、0.01 m 长度时 T 形地连墙和锚碇结构内力弯矩分布情况见图 5。可以看出,随着建模计算精度的提高,T 形地连墙海侧弯矩逐渐增大,陆侧弯矩逐渐减小;锚碇结构海侧弯矩逐渐减小,陆侧弯矩逐渐增大。

随着模型建模精度的提高,T 形地连墙嵌固土体发生塑性变形的部位逐渐下移,导致 T 形地连墙的海侧弯矩增大,陆侧弯矩减小,同时位移和拉杆拉力增大,进而使锚碇结构陆侧弯矩增大。不同单元划分长度下码头结构内力和位移结果见表 4。



a) T形地连墙



b) 锚碇结构

图 5 不同单元划分长度下的弯矩分布

表 4 不同单元划分长度下码头结构内力及位移结果

单元长度/m	节点总数/个	前墙位移/mm	T 形地连墙海侧最大弯矩/(MN·m)	T 形地连墙陆侧最大弯矩/(MN·m)	锚碇结构海侧最大弯矩/(MN·m)	锚碇结构陆侧最大弯矩/(MN·m)	拉杆拉力/MN
1.00	59	49.7	16.507	14.979	2.304	1.265	3.227
0.50	113	52.0	17.659	14.006	2.071	1.572	3.385
0.10	552	54.0	18.617	13.590	1.861	1.938	3.475
0.01	5 502	54.8	18.984	13.329	1.944	2.040	3.510

T 形地连墙位移计算结果随着建模节点数变化曲线见图 6,由图可知,随着建模精度的提高,位移值变化趋于稳定。结合表 4 中的数据,单元划分长度 0.10 和 0.01 m 结果对比,可知节点数量增加 10 倍,码头各构件的内力值和位移值变化幅度小于 2%。综合考虑计算资源和工程计算精度,单元划分长度取 0.10 m 即可满足要求。

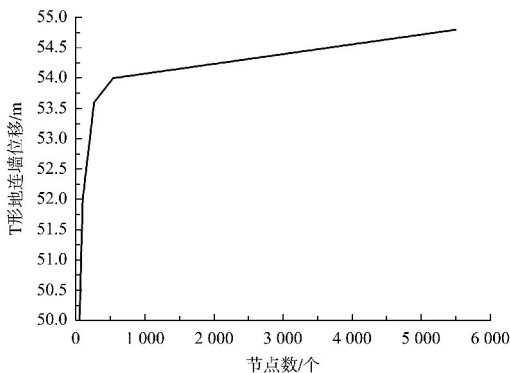


图 6 前墙位移随建模节点数变化

3.2 T形地连墙入土深度对结构内力和位移的敏感性分析

本文将码头结构规范中板桩码头前墙入土深度计算公式的右侧计算结果和左侧计算结果的比值定义为踢脚稳定安全系数。计算分析了 T 形地连墙底高程为-31.5、-33.0 和-34.5 m 时地连墙内力及码头结构踢脚稳定安全系数等参数。在满足踢脚稳定的前提下,随着 T 形地连墙入土深度的增加,其海侧弯矩逐渐减小,陆侧弯矩逐渐增大,且位移呈现减小趋势,与文献[5]的研究结论相吻合,见表 5。

表 5 T 形地连墙不同入土深度下码头结构内力及位移

墙底 高程/ m	前墙 位移/ mm	T 形地连墙 海侧最大弯矩/ (MN·m)	前 T 形地连墙 陆侧最大弯矩/ (MN·m)	踢脚稳 定安全 系数
-31.5	56.1	20.208	9.641	1.05
-33.0	54.0	18.617	13.590	1.21
-34.5	52.3	17.174	17.311	1.37

增大 T 形地连墙的入土深度,可以使墙体两侧弯矩趋于平衡,见图 7。可以看出,随着入土深度的增大地连墙陆侧弯矩变化更为明显。地连墙在土压力作用下发生变形,沿高度各点的水平位移不同,并非都达到产生主动土压力和被动土压力所需的位移,墙后主动土压力实际呈 R 形分布^[6]。本计算模型中墙后主动土压力按直线分布考虑,因此随入土深度的增大,模型中土压力分布与实际分布产生偏差,使地连墙陆侧弯矩产生较大变化。

在工程设计过程中,确定 T 形地连墙底高程时,在满足踢脚稳定前提下,综合考虑造价及前后侧截面受弯承载力,建议尽量减小入土深度,以更好地匹配实际情况。

表 6 回填料 m 值不同取值码头结构内力及位移

回填料 m 值/ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-4}$)	前墙 位移/mm	T 形地连墙海侧最大 弯矩/($\text{MN} \cdot \text{m}$)	T 形地连墙陆侧最大 弯矩/($\text{MN} \cdot \text{m}$)	锚碇结构海侧最大 弯矩/($\text{MN} \cdot \text{m}$)	锚碇结构陆侧最大 弯矩/($\text{MN} \cdot \text{m}$)	拉杆拉力/ MN
4.000	56.8	18.529	13.815	1.611	2.918	3.467
6.000	54.0	18.617	13.590	1.861	1.938	3.475
10.000	51.4	18.720	13.330	2.068	0.998	3.485

工程回填砂 m 取值 $6\,000\text{ MN/m}^4$,锚碇结构前后侧弯矩值基本相同,两侧可相同配筋。在锚碇结

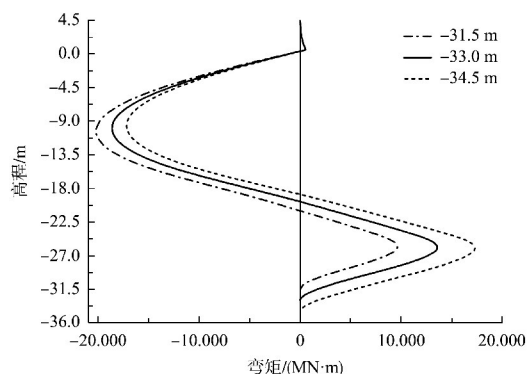


图 7 不同入土深度下 T 形地连墙弯矩分布

3.3 回填料 m 值选取对结构内力及位移的敏感性分析

地连墙码头拉杆安装后在其上方回填砂、石形成码头面,工程回填料选用中粗砂,《码头结构设计规范》附录 K 中给出砂的 m 建议值为 $4.000 \sim 10.000\text{ MN/m}^4$ 。回填砂 m 值分别取 4.000 、 6.000 、 10.000 MN/m^4 时码头结构内力和位移结果见表 6。可知锚碇结构的内力对 m 值比较敏感,随着 m 值变大,锚碇结构海侧弯矩变大,陆侧弯矩变小,且陆侧弯矩变化程度比较明显,见图 8。回填料 m 值越大,提供给锚碇结构前的水平地基抗力系数越大,土抗力越大使得陆侧弯矩减小。

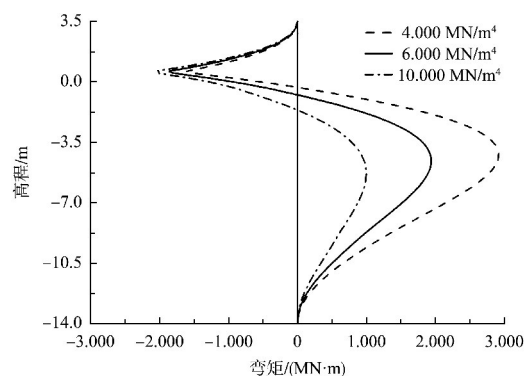


图 8 不同回填料 m 值锚碇结构弯矩分布

构设计过程中,可在回填料 m 值范围内选取不同值进行试算,在保证锚碇结构稳定性的前提下,使墙

体两侧弯矩趋于协调、平衡,选取合适的回填料 m 值,必要时对回填料进行处理以达到设计要求。

4 结论

1) 随着计算单元划分精度的提高,T形地连墙海侧弯矩逐渐增大,陆侧弯矩逐渐减小;锚碇结构海侧弯矩逐渐减小,陆侧弯矩逐渐增大;单元划分长度减小到一定程度时,两者结构内力及位移趋于稳定。建议根据实际计算资源的能力及工程对结构精度的要求,选取合适的单元划分精度。

2) 在满足踢脚稳定的前提下,随着T形地连墙底端入土深度的增加,墙体海侧弯矩逐渐减小,陆侧弯矩逐渐增大,且位移呈减小趋势。在T形地连墙底高程的设计过程中,应综合考虑踢脚稳定性要求、工程造价和截面受弯承载能力等因素,尽量减小墙体入土深度。

3) 锚碇结构内力对回填料 m 值的选取敏感度较大,随着 m 值的增大,锚碇结构海侧弯矩增大,陆侧弯矩减小,且陆侧弯矩变化程度较为明显。

(上接第36页)

3 结论

1) 对沉箱等底板厚度较大的四边固定板,按有限元计算的板边剪力分布与有关结构设计手册按弹性理论计算给出的三角形分布有一定差异,有限元计算的剪力分布呈类抛物线形,剪力最大值小于按弹性理论计算的最大值。

2) 底板厚度与板边缘最大剪力值呈反向相关关系,在相同尺度和荷载情况下,板厚增大板边最大剪力值将有所减小,对大型沉箱适当增加底板厚度提高抗剪强度是合理有效的。

3) 在荷载相同的情况下,边长增大板边缘最大剪力将迅速增大,最大剪力与平均剪力之比也有所增大,但最大剪力与平均剪力之比增大幅度较小。

4) 矩形板在短边和荷载相同的情况下,随着长宽比的增大短边最大剪力值基本不变。当长宽比小于1.5时,长边最大剪力值显著增大;当长宽比达到1.5以上时,长边最大剪力值增速放缓;长宽比达到2以上时,长边最大剪力值基本不变,

在锚碇结构设计过程中,应合理选取回填料的 m 值,在保证锚碇结构稳定性的前提下,尽量使墙体两侧弯矩趋于协调、平衡。

参考文献:

- [1] 孙新鹏,张飞. T型地下连续墙结构在深水码头中的应用[J]. 水运工程, 2015(10): 63-66.
- [2] 张飞,孙新鹏,李荣庆. T型地连墙结构 m 法计算中的问题和改进[J]. 水运工程, 2016(S1): 148-152.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李荣庆,黄金鑫,杨国平. 板桩结构非线性有限元分析[J]. 水运工程, 2010(2): 110-115.
- [6] 李荣庆. 港口工程板桩结构和桩基可靠度分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

(本文编辑 赵娟)

表现为单向板的特征。

5) 对底板厚度为0.5~1.0 m、纵横隔墙间距3.0~5.0 m的沉箱,板边缘最大剪力与平均剪力之比通常为1.3~1.6,可作为前期设计阶段确定沉箱主尺度的参考。

参考文献:

- [1] 钟阳,李锐,刘月梅. 四边固支矩形弹性薄板的精确解析解[J]. 力学季刊, 2009, 30(2): 297-303.
- [2] 孙建,胡洋. 均布和静水压力作用下固支矩形板薄板力学特性[J]. 应用力学学报, 2015, 32(6): 908-914.
- [3] 马仁香. 均布荷载下四边固支矩形薄板的挠度[J]. 计算机辅助工程, 2021, 30(4): 22-25, 31.
- [4] 沈世杰,王大岭,王长祥,等. 给排水工程结构设计手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 266-285.
- [5] 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.

(本文编辑 赵娟)