

文章编号: 1005-9865(2002)01-0052-05

梳式沉箱翼缘板设计理论的研究

张 涛, 王清湘, 赵国藩

(大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 结合模型试验, 分析了梳式沉箱翼缘板的静力和自振特性。研究了三种不同支承形式的翼缘板在最不利荷载下的内力分布, 为梳式沉箱翼缘板的设计提供了依据。

关键词: 梳式沉箱; 翼缘板; 有限元法; 自振特性

中图分类号: U652.7 **文献标识码:** A

Research of design theory for flange plate of comb-type caisson

ZHANG Tao, WANG Qing-xiang, ZHAO Guo-fan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The comb-type caisson is a new structural type of breakwaters. Based on the model test results, the static and self-oscillation behaviors are analyzed. The internal stresses of the flange plate with three different boundary conditions are calculated and a basis for designers is provided.

Key words: comb-type caisson; flange plate; finite element method; self-oscillation

随着港口运输事业的发展, 以沉箱结构为主体的直立堤广泛应用于防波堤中。但由于沉箱体积大, 造价高, 特别是波浪经直立堤反射后形成立波, 对航道、港内泊稳及堤身的稳定、堤前海底冲刷都会造成一定的影响^[1]。鉴于此情况, 提出了一种新型的防波堤方案, 将两侧带有翼板的钢筋混凝土矩形梳式沉箱用于大连港大窑湾港区岛堤工程的主体结构^[2]。

由于波浪荷载对翼缘板的影响较为复杂, 本文结合模型试验, 在分析其静力和自振特性的基础上, 研究了三种不同支承形式的翼缘板在最不利荷载下的内力分布, 为梳式沉箱翼缘板的设计提供了依据。

1 试验研究

1.1 梳式沉箱翼缘板的设计特点

梳式沉箱是一种新型防波堤结构型式(见图 1), 其设计特点如下:

- 1) 沉箱顶部的混凝土胸墙位于沉箱靠港的一侧, 可以减小流浪作用力, 并消减反射波。
- 2) 沉箱两侧的上部, 沿迎水面分别挑出一块下部可透水过流的半潜式翼缘板(见图 1)。其功能主要有两个: 一是以板代替了箱体, 减小了沉箱体积及造价, 并且便于施工; 二是翼缘板为半潜式, 上部能有效地消减波能, 下部透水过流, 可使港内外海水交换, 对港湾的环境保护是有利的, 且对泊稳影响不大。

1.2 试验模型及方法概述

目前国内外对于半潜式翼缘板的设计还没有研究。因此, 有必要通过模型试验^[3]和理论分析, 研究波浪荷载对翼缘板的影响。

收稿日期: 2000-11-06

基金项目: 国家重点科技攻关项目(96-415-02-03)

作者简介: 张涛(1972-), 女, 山西人, 博士研究生, 主要从事结构工程研究。

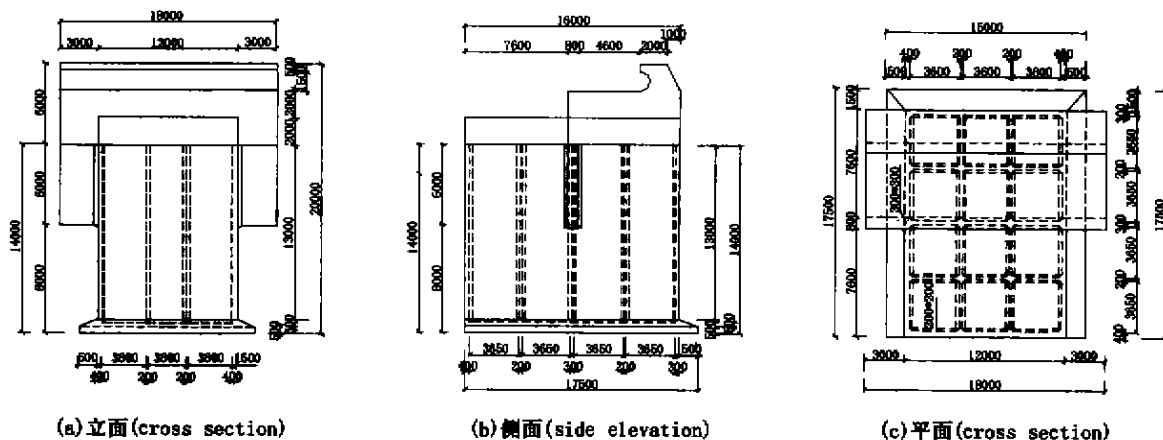


图1 沉箱外形图

Fig.1 Profile of caisson

试验用波流水槽长 69 m, 宽 2 m, 高 1.8 m。波浪由美国 MTS 公司生产的液压式推板造波机产生。试验水深分别为 34.7 cm、32.2 cm、24.3 cm (相当于原型校核高水位 15.6 m、设计高水位 14.5 m、设计低水位 10.94 m); 波高 H 为 12.0 ~ 17.6 cm (相当于原型 5.4 ~ 7.92 m); 周期 T 为 1.30 ~ 8.89 s (相当于原型 8.72 ~ 4.00 s)。

模型由有机玻璃制作, 按 Froude 重力相似准则进行模拟, 其几何尺寸与原型相似, 几何比尺为 1:45。

翼缘板上共布置 12 个测点 (见图 2)。设计高水位时测得的波浪压力见表 1。翼缘板前后相应测点的极大值、极小值的差值分别为翼缘板在波峰、波谷作用时的试验波浪压力值。

表1 翼缘板各测点波浪压力的极大值和极小值 (t/m^2)

Tab.1 The maximum and minimum wave pressure values of

testing points of comb-type plate (t/m^2)

测点号	极大值	极小值	测点号	极大值	极小值
121	3.41	-3.37	124	3.57	-3.31
122	3.15	-4.42	125	3.06	-4.30
123	2.85	-4.22	126	2.85	-4.21
127	2.01	-1.70	130	1.74	-1.64
128	1.84	-1.78	131	1.74	-1.73
129	1.73	-1.96	132	1.76	-2.02

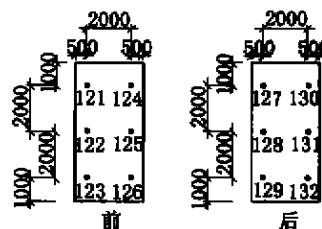


图2 翼缘板测点布置

Fig.2 Distribution of testing points of comb-type plate

2 有限元计算成果分析

2.1 计算条件

翼缘板有关的计算条件为: 翼缘板长 6 m、宽 3 m、厚 0.8 m; 混凝土标号 C30, 弹性模量 3×10^4 MPa, 泊松比 0.167, 容重为 24 kN/m³。翼缘板与沉箱的连接考虑三种形式 (见图 3): (a) 一边固定; (b) 相邻边一边固定一边简支; (c) 相邻两边固定。

重现期为 50 年时, 设计波浪要素如下: $H_{1\%} = 7.88$ m, $T = 9.40$ s。根据 JTJ10-89, 按立波理论计算波峰、波谷作用时的波浪作用力 (见图 4)。有限元网格剖分见图 5。

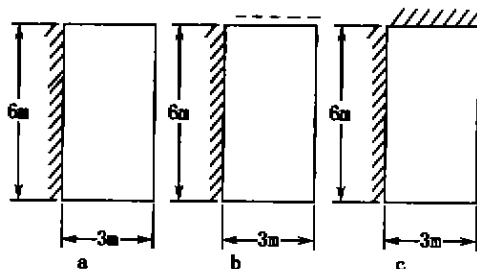


图3 翼缘板的三种支承形式

Fig.3 Three boundions of comb-type plate

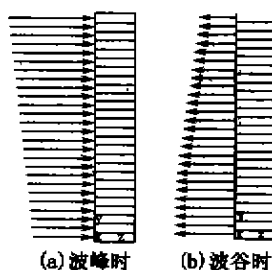


图4 波压力分布图

Fig.4 Distribution of wave pressure

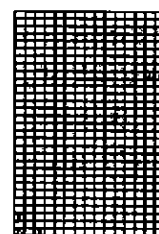


图5 翼缘板网格剖分图

Fig.5 Grid configuration of comb-type plate

2.2 计算模型

根据板的理论,当板的厚度与最小宽度之比(即厚跨比)大于或等于 0.2^[4]时,常用的薄板模型由于忽视了横向剪切变形的影响,给计算带来一定的误差。表 2 给出了以经典薄板理论计算三种不同支承形式的翼缘板引起的误差,其大小随着支承形式及翼缘板区域的不同而不同,有的甚至超过 350%。

表 2 经典薄板理论计算翼缘板引起的误差

Tab.2 The calculation errors of comb-type plate with classical theory of thin plate

支承形式	挠度 w		应力 σ_x		应力 σ_y	
	位置	误差	位置	误差	位置	误差
一边固定	$a/5, 0$	-19.9	$0, b/3$	6.7	$a/5, 2b/3$	4.61
	$2a/5, b/3$	-13.8	$3a/5, 2b/3$	0.7	$3a/5, b/6$	68.44
	$a, b/2$	-4.8	$a, b/2$	71.8	$a, b/2$	32.64
相邻边一边固定	$a/5, 0$	-26.08	$0, b/3$	1.01	$a/5, 2b/3$	51.84
一边简支	$2a/5, b/3$	-17.64	$3a/5, 2b/3$	-53.21	$3a/5, b/6$	-22.46
	$a, b/2$	-10.24	$a, b/2$	353.25	$a, b/2$	11.8
相邻两边固定	$a/5, 0$	-28.29	$0, b/3$	5.62	$a/5, 2b/3$	2.29
	$2a/5, b/3$	-19.65	$3a/5, 2b/3$	-46.21	$3a/5, b/6$	-1.85
	$a, b/2$	-12.7	$a, b/2$	321.49	$a, b/2$	21.84

注:厚跨比为 0.27,宽跨比为 2; a 为板的宽度, b 为板的长度。

为了更直观地了解剪切变形带来的影响,图 6 示出了图 4(a)荷载作用下悬臂矩形板(图 3a) $x=3$ 和 $y=6$ 的挠度分布。可见随着厚度的增加,剪切效应越来越显著。本次计算中翼缘板的厚跨比为 0.267,图 6 显示了薄板理论的计算结果引起的误差。因此,应对翼缘板按厚板模型进行力学性能分析。

2.3 应力成果分析

三种不同支承下,翼缘板在波峰和波谷作用时的应力计算结果见表 3。

表 3 翼缘板最不利内力比较

Tab.3 Comparison of the maximum internal stress of comb-type plate

支承形式	荷载传递方向	最大应力 出现区域	波峰作用 (最大应力 MPa)		波谷作用 (最大应力 MPa)		单宽最大弯矩 标准值(kN.m) M
			σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	
一边固定	短边	翼缘板与沉箱 的固定连接处	± 3.218	± 0.537	∓ 1.785	∓ 0.298	343
相邻边一边固定 一边简支	长短边	板的左下部 和右上部	± 2.819	± 0.516	∓ 1.734	∓ 0.290	301
相邻两边固定	长短边	板的左下部 和板的右角点	± 2.660	± 1.998	∓ 1.672	∓ 0.829	284

2.4 自振特性

2.4.1 振型分析

表 4 给出了三种不同支承形式下翼缘板三个主要模态的自振频率和周期。从表 4 的计算结果可看出,不论何种支承形式,翼缘板的第一自振周期都很小,约为 0.01~0.02 s,与波浪周期相差甚远,因此在波浪荷载作用下,翼缘板不会发生共振。表 4 的计算结果进一步表明,随着翼缘板与沉箱的连接加强,即约束条件由一边固定到相邻两边固定,板的第一自振周期由 $2.096\ 5\text{E}-02\text{ s}$ 减小到 $1.740\ 4\text{E}-02\text{ s}$ 。

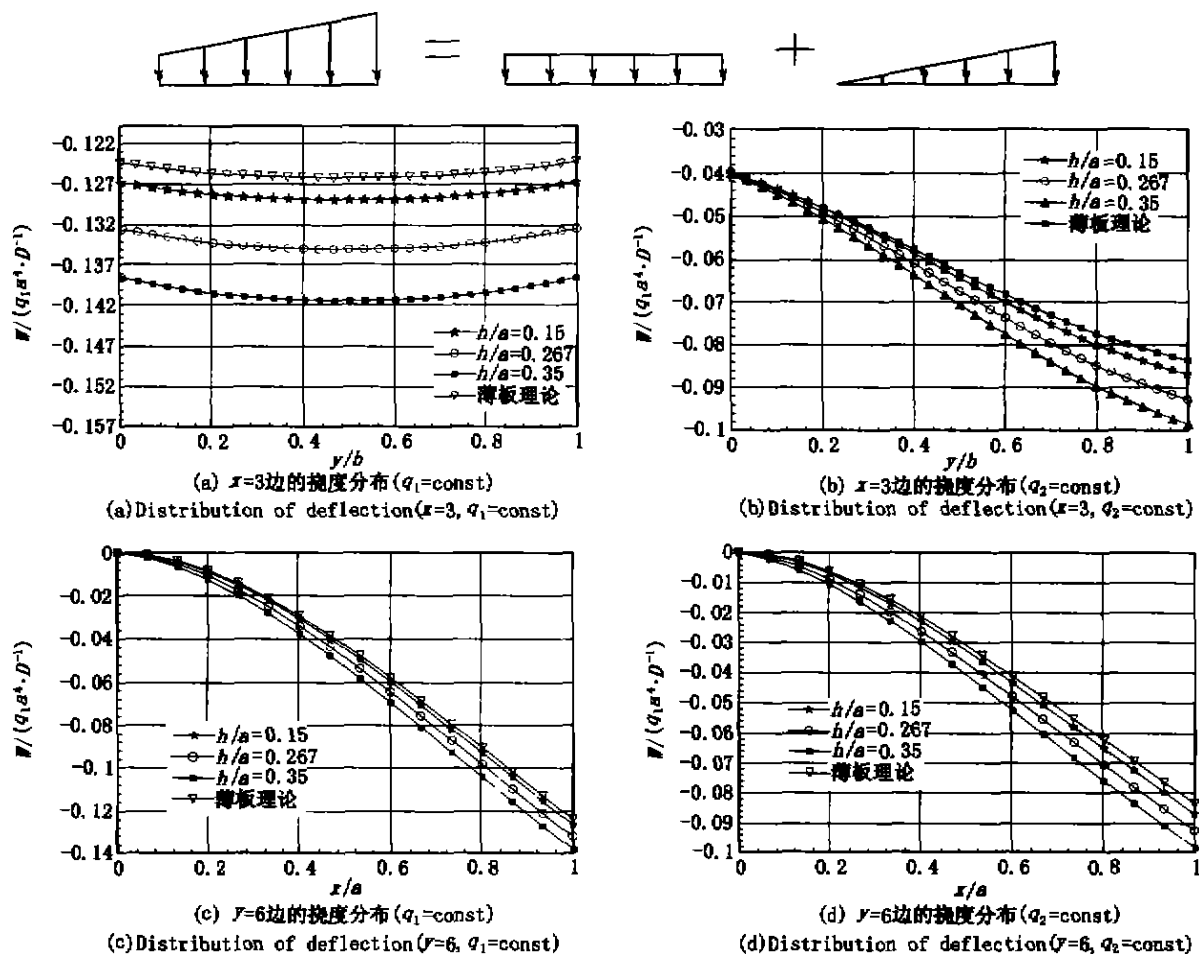


图6 挠度分布

Fig.6 Distribution of deflection

表4 三种支承形式下翼缘板自振频率比较

Tab.4 Comparison of natural frequency of comb-type plate with three different boundary conditions

支承形式	模态 NO.	自然圆频率 (rad/s)	自然频率 (Hz)	周期 (s)
一边固定	1	2.996 9E+02	4.769 7E+01	2.096 5E-02
	2	4.402 6E+02	7.006 9E+01	1.427 2E-02
	3	7.629 6E+02	1.214 3E+02	8.235 2E-03
相邻边一边固定 一边简支	1	3.429 0E+02	5.457 4E+01	1.832 4E-02
	2	6.231 6E+02	9.917 9E+01	1.008 3E-02
	3	1.103 6E+03	1.756 4E+02	5.693 5E-03
相邻边两边固定	1	3.610 1E+02	5.745 7E+01	1.740 4E-02
	2	6.957 0E+02	1.107 2E+02	9.031 5E-03
	3	1.182 8E+03	1.882 5E+02	5.312 0E-03

2.4.2 悬臂翼缘板自振周期的简化计算方法

对于厚板振动的分析,用有限元方法计算比较复杂。为了工程方便,厚板振动频率可用相应的薄板计算公式乘以厚化系数给出^[5],即:

$$\omega = \bar{\omega} \times C_{\omega H} \quad (1)$$

式中: ω 为厚板频率, $\bar{\omega}$ 为相应薄板的频率, $C_{\omega H}$ 为频率厚化系数。

参考文献[6]并考虑厚板的影响,给出宽度为 a , 长度为 b , 厚度为 h 的悬臂板自振周期的计算公式:

$$T = \frac{2\pi a^2}{C_{eff}\lambda_i} \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (2)$$

其中, a 为板的宽度; D 为板的刚度, $D = \frac{Eh^2}{12 \times (1 - \mu^2)}$; E 弹性模量; μ 泊松比; h 厚度; m 为板单位面积的质量, $\bar{m} = \gamma h / g$ 或 $\bar{m} = \rho h$; γ 为比重; ρ 为密度; C_{eff} 为频率厚化系数。 $a/b = 0.5$, $h/a = 0.27$ 时, 第一振型为 0.945 6, 第二振型为 0.483 90, 第三振型为 0.386 07。 λ_i 为薄板频率系数; i 为振型数, $a/b = 0.5$ 时, $\lambda_1 = 3.48$, $\lambda_2 = 9.99$, $\lambda_3 = 21.7$ 。

频率厚化系数 C_{eff} 的大小反映了考虑剪切变形、转动惯量等因素的厚板频率偏离薄板频率的大小, 它随振型的阶数 n 、厚跨比 h/a 和长宽比 b/a 而变化。从图 7 悬臂板 ($b/a = 2$, $\mu = 0.167$) 的频率厚化系数变化图中可以看出, 随厚跨比 h/a 增大, C_{eff} 减小; 随振型阶数 n 的增大, C_{eff} 也减小, 即厚板频率 ω 与薄板频率 $\bar{\omega}$ 的差别越大。从图 8 悬臂板的基频厚化系数 (即 $\omega_1/\bar{\omega}_1$) 随厚跨比及长宽比的变化曲线可以看出, 当厚跨比增加时, 基频厚化系数随长宽比的增加而增大, 即厚板频率 ω 与薄板频率 $\bar{\omega}$ 的差别越小。

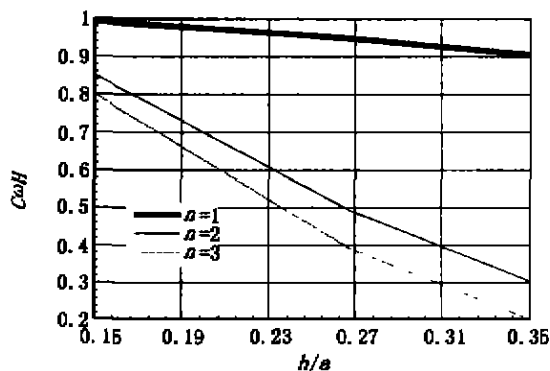


图 7 $C_{eff} - n - h/a$ 关系 ($b/a = 2$)

Fig.7 Relationships between C_{eff} , n and h/a ($b/a = 2$)

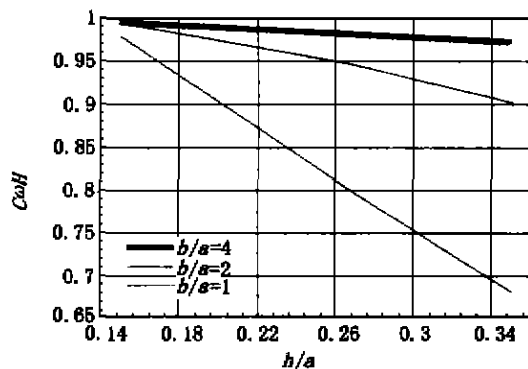


图 8 $C_{eff} - b/a - h/a$ 关系 ($n = 1$)

Fig.8 Relationships between C_{eff} , b/a and h/a

3 结 语

1) 本次计算中翼缘板的厚跨比为 0.267, 需要考虑剪切变形对翼缘板的影响, 即对翼缘板应按厚板模型进行力学性能分析。

2) 翼缘板的三种支承形式, 各有其优缺点: 当采用一端固定的支承形式时, 其受力明确, 计算简单, 构造简单, 施工方便, 但固端弯矩较大; 当采用相邻两边一边固定一边简支时, 翼缘板的受力较为有利, 但需考虑胸墙与翼缘板的连接, 增加一定的施工难度; 当胸墙与翼缘板整浇时, 可认为翼缘板的相邻两边固定, 这种连接方式使作用在翼缘板上的荷载沿两个方向传递, 减小了固端弯矩, 对翼缘板的受力非常有利, 但需在翼缘板上方预埋插筋, 然后与胸墙整体浇注, 给施工带来困难。

3) 翼缘板的自振周期较小, 约为 0.01 ~ 0.02 s, 与波浪周期相差甚远, 动力反应很小, 不会发生共振。

4) 长宽比一定时, C_{eff} 随厚跨比、振型阶数 n 的增大而减小。当厚跨比增加时, 基频厚化系数 C_{eff} 随长宽比的增加而增大。

参考文献:

- [1] 谢世楞. 90 年代我国防波堤设计进展[J]. 水运工程, 1999, (10);
- [2] 杨荣喜. 深水防波堤透空结构设计研究[J]. 中国港湾建设, 1996, (4);
- [3] 大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室. 深水防波堤新型结构型式研究专题研究报告之三—梳式沉箱方案总力、波压力分布及水理特性研究[R]. 1998, 11.
- [4] 吴连元. 板壳理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989, 6.
- [5] 曹志远, 杨升田. 厚板动力学理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [6] R Szilard. 板的理论和分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.