



双层水平板式防波堤结构箱型水平板研究

王志勇^{1,2}, 朱浩^{1,2}, 刘国宝²

(1. 大连理工大学, 辽宁大连 116023; 2. 大连中交理工交通技术研究院有限公司, 辽宁大连 116023)

摘要: 双层水平板式防波堤是一种新型的水工结构物, 采用上下两层水平板达到消浪、透水的目的。本文研究的水平板采用钢制箱型板结构。根据物理模型试验测定的波浪荷载, 应用ANSYS有限元软件, 分别探讨不同支承形式、钢板厚度、H型钢加劲肋个数和型号等因素对水平板应力和变形的影响, 并与传统计算方法相比较, 为双层水平板式防波堤的结构设计及工程应用提供参考。

关键词: 双层水平板; 板式防波堤; 钢制箱型板; ANSYS; 结构设计

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0051-06

Box-type horizontal plate of twin-plate breakwater structure

WANG Zhi-yong^{1,2}, ZHU Hao^{1,2}, LIU Guo-bao²

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Dalian CCCC Research Institute Co., Ltd. for Communications Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The twin-plate breakwater is a new type of harbor engineering structure using twin horizontal plates to attenuate waves and permeate seawater. The horizontal plate expounded in this paper uses steel box-type plate structure. According to the physical model tests, this paper investigates the influence of different supporting forms, different thicknesses of steel plates, different numbers and model numbers of H-beam stiffeners on the stress and deformation of the horizontal plate by the finite element software ANSYS. Comparing the numerical simulation results with those by the traditional calculation method, it provides a reference for the structure design and engineering applications of twin-plate breakwater.

Key words: twin horizontal plates; plate-type breakwater; steel box-type plate; ANSYS; structural design

水平板透空式防波堤是一种新型的防波堤结构, 它具有如下特点: 1) 结构透空, 可以保持堤内外良好的海水交换能力, 基本不会影响沿岸水质和海洋生态功能; 2) 消浪效果较好, 一般适用于水深较大, 波高较小的短周期波浪情形; 3) 对海床地质条件要求不高, 对软弱地基的适应性良好。双层水平板式防波堤就是其中的一种, 近年来越来越引起研究者的重视。R. Usha和T. Gayathri^[1]从线性势波理论出发, 研究了双层水平板式防波堤对二维波浪的反射和透射情况, 结果表明任何相对潜深条件下, 双层水平板式防

波堤的消浪效果都优于其它水平板式结构, 如单层自由水面板、单层潜式板及多层潜式板结构。S. Neelaman和T. Gayathri^[2]通过物理模型试验研究了入射规则波及不规则波的波高和周期范围较大时, 单层自由水面板和双层板与波浪作用时的水动力特性及波浪的透射系数和反射系数。试验结果表明, 通常情况下, 双层板的水动力性能要优于单层板, 能更有效地减少透射波浪。现有的成果多是对双层水平板式防波堤的消浪性能和水动力特性的研究, 而对水平板的结构形式和受力特性的研究相对较缺乏。

收稿日期: 2012-04-17

作者简介: 王志勇(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口工程结构研究。

根据文献[3],应用ANSYS有限元软件,分别探讨了不同的支承形式、钢板厚度、H型钢加劲肋个数和型号等因素对水平板应力和变形的影响。并与传统计算方法相比较,为双层水平板式防波堤的结构设计和工程应用提供参考。

1 双层水平板式防波堤结构箱型水平板设计

双层水平板式防波堤由上下2块相同尺寸的薄板构成,横梁、桩帽和桩柱是水平板的支撑结构(图1)。

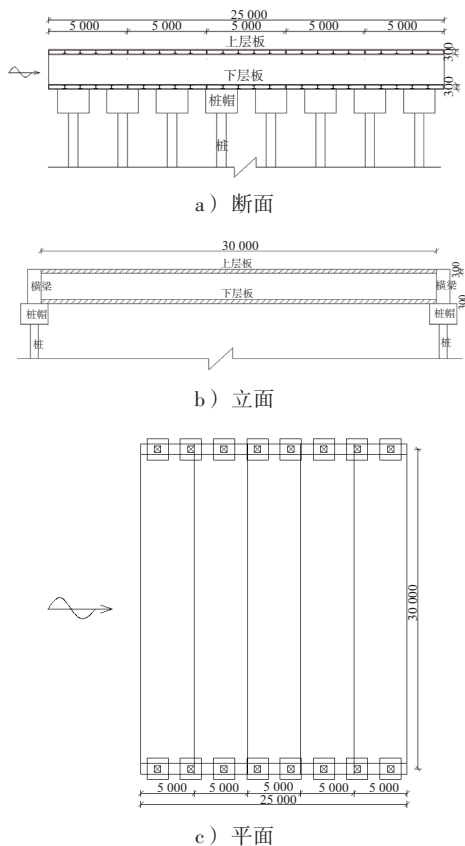


图1 双层水平板式防波堤结构(单位: mm)

混凝土水平板自重较大,强度有限,当跨度比较大时,板厚度较大,上、下两层水平板之间的净距会比较小,影响板的消浪效果;同时作用在厚板上的波浪水平力较大,不利于结构稳定。钢结构水平板比较薄,消浪效果好,而且自重小、强度高,跨度大,易于工程实现。

作用在水平板上的波浪浮托力较大,因此引起结构下部桩柱的上拔力很大,不利于结构的稳定。本文研究的水平板采用钢制箱型板结构,它由空心箱型板和H型钢加劲肋两部分组成,空心

箱型板由4块钢板焊接而成。箱型板空心内可以加填料来增大水平板的质量,抵消掉部分波浪浮托力,减小桩的上拔力,节省钢材的用量。

根据物理模型试验的模型尺寸^[3],上下2块水平板沿波浪传播方向上的宽度为25 m,由5块钢制箱型板拼接而成,单块箱型板的设计尺寸为:长30 m,宽5 m,高0.3 m。H型钢加劲肋根据不同个数在空心板内等间距分布,并沿板跨度方向通长布置。

根据文献[3],在波高 $H=3$ m,周期 $T=6$ s的前提下,在不同水深情况下,根据物理模型试验测定的作用在双层水平板上的最大上托压强和最大下压压强值见表1。

表1 不同水深下作用在双层板上的最大波浪压强 kPa

| 水深/ m | 上层板 | | 下层板 | |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| | 最大上托压强 | 最大下压压强 | 最大上托压强 | 最大下压压强 |
| 9 | 9.325 | 7.425 | 20.625 | 20.325 |
| 10 | 24.625 | 10.075 | 15.825 | 23.025 |
| 11 | 20.875 | 16.325 | 13.000 | 8.150 |

水平板的上下表面均受到波浪力的作用,合田良实^[4]认为作用于透空式面板波浪上托力是冲击性荷载,在波浪作用区内的压强是均匀分布的。由表1可知,在水深 $d=10$ m的情况下,作用在上层板的最大上托压强最大,值为24.625 kPa,下层板的最大下压压强最大,值为23.025 kPa。最大下压压强和自重的作用力方向均向下,考虑最不利情况,选取下层板为研究对象,荷载为作用在下层板表面上的最大下压压强和结构的自重。

2 双层水平板式防波堤结构箱型水平板有限元分析

2.1 有限元模型的建立

应用ANSYS有限元软件,按照三维实体结构建立有限元模型。考虑结构和荷载的对称性,本文对计算模型简化,选取1/4箱型板结构进行建模,模型包括空心箱型板和H型钢加劲肋,1/4箱型板的设计尺寸为:长15 m,宽2.5 m,高0.3 m;H型钢加劲肋和空心箱型板刚结。对结构进行线弹性分析,单元类型选用8节点三维实体线性单元SOLID45;材料选用Isotropic Linear Elastic Material,

其中弹性模量 $E=2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\mu=0.3$, 钢的密度 $\rho=7\ 850 \text{ kg/m}^3$ 。箱型板的单元网格长度为 0.02 m 。1/4箱型板结构的有限元模型如图2所示。

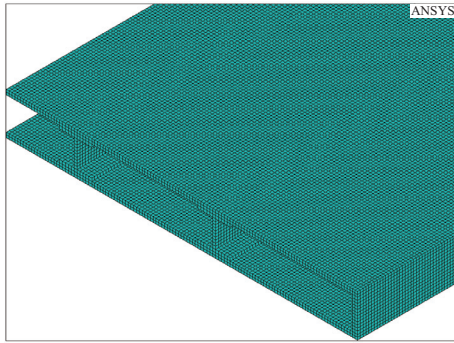


图2 1/4箱型板结构的有限元模型

2.2 边界约束和荷载施加

1/4箱型板结构有2种不同的支承形式: 形式1是两端固接, 形式2是两端铰接。考虑对称性, 结构的端面上施加实际支座约束, 两对称面上施加对称位移约束(图3)。

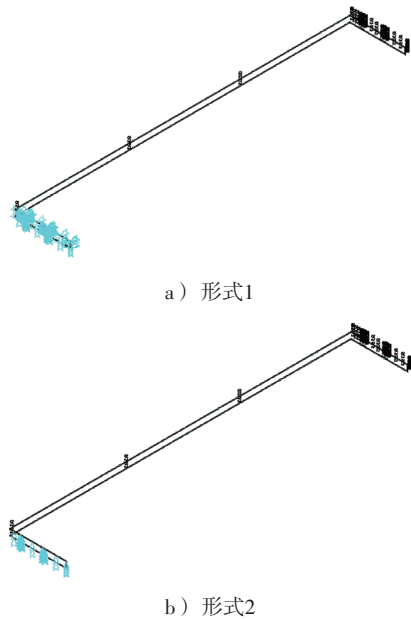


图3 箱型板结构的2种支承形式

荷载施加情况, 在箱型板的上表面施加 $23\ 025 \text{ Pa}$ 的下压压强, 并在ACELY文本框中输入重力加速度 9.8 , 定义一个沿 Y 方向的重力加速度, 大小为 9.8 m/s^2 。

2.3 计算结果及分析

2.3.1 不同支承形式的影响

1/4箱型板结构长 15 m , 宽 2.5 m , 高 0.3 m , 钢

板厚 35 mm , 加4个型号为 $\text{HW}230 \times 230 \times 20 \times 20$ (H型钢的规格标记采用: 高度 $H \times$ 宽度 $B \times$ 腹板厚度 $t_1 \times$ 翼缘厚度 t_2)的H型钢加劲肋。有2种不同的支承形式: 形式1是两端固接, 形式2是两端铰接(图3)。

计算结果如图4~7所示。从图4可以看出, 在支承形式1情况下, 结构在两端侧面4个角点上出现应力集中, 存在应力奇异点, 两端侧面的上下2条边附近的等效应力值要大于其他部位的值, 剔除应力奇异点处的等效应力峰值, 箱型板结构的等效应力最大值为 295 MPa ; 在支承形式2情况下(图5), 结构在两端侧壁上出现应力集中, 存在应力奇异点, 两端侧面附近的等效应力值大于其他部位的值, 剔除应力奇异点处的等效应力峰值, 箱型板结构的等效应力最大值为 435 MPa 。在图6和图7中, 2种支承形式下结构的变形趋势基本一致, 变形最大值都出现在板跨中间处, 值分别为 228 mm 和 230 mm 。

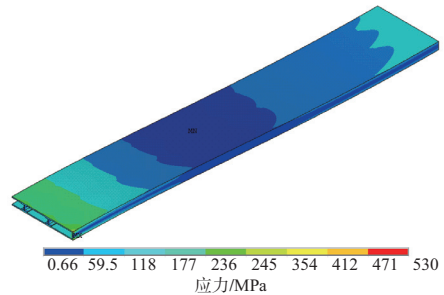


图4 支承形式1箱型板结构等效应力云图

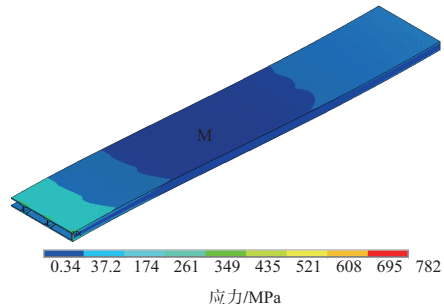


图5 支承形式2箱型板结构等效应力云图

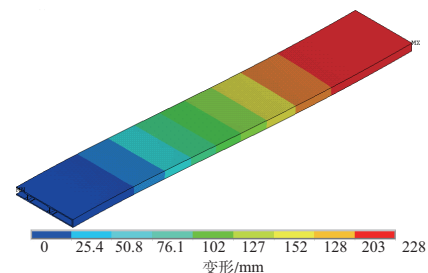


图6 支承形式1箱型板结构变形云图

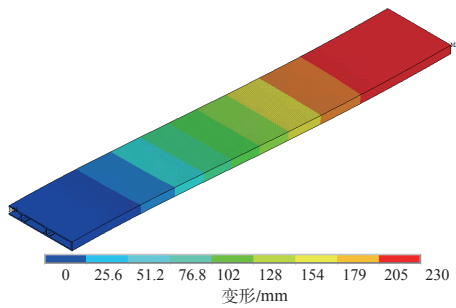


图7 支承形式2箱型板结构变形云图

根据JTJ 283—1999《港口工程钢结构设计规范》规定，厚度大于16 mm小于等于35 mm的Q345钢的强度设计值为295 MPa^[5]。由计算结果可知，结构的支承形式采用两端固接，等效应力最大值位于箱型板两端侧面的上下2条边附近，其值为295 MPa，满足材料的强度设计值要求；而两端铰接，结构的等效应力最大值为435 MPa，大于Q345钢的强度设计值295 MPa^[5]。

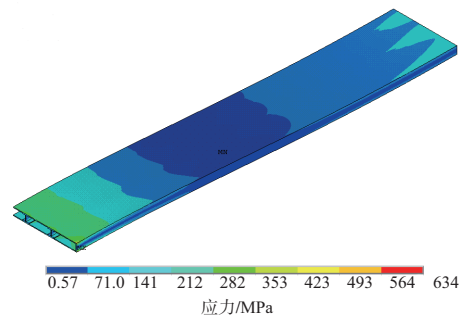
2.3.2 不同钢板厚度的影响

箱型板结构的支承形式采用两端固接，加4个H型钢加劲肋，钢板的厚度分别取25 mm，30 mm和35 mm。当板厚为25 mm时，H型钢为HW250×250×20×20；当板厚为30 mm时，H型钢为HW240×240×20×20；当板厚为35 mm时，H型钢为HW230×230×20×20（表2）。

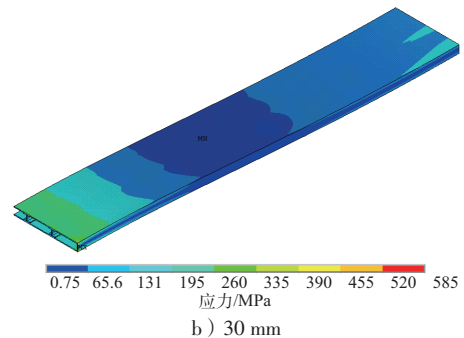
表2 不同板厚情况箱型板结构的应力和变形

| 板厚/ mm | 等效应力 | | 变形 | |
|-----------|-------------|-------------------------|------------|-----------------------|
| | 最大值/ MPa | 与板厚35 mm结构等 效应力最大值之比 | 最大值/ mm | 与板厚35 mm结构 变形最大值之比 |
| 25 | 353 | 1.197 | 268 | 1.175 |
| 30 | 325 | 1.102 | 245 | 1.075 |
| 35 | 295 | 1.000 | 228 | 1.000 |

计算结果如图4、8所示：3种板厚情况下结构的等效应力和变形分布趋势基本一样，只是具体数值不同。表2中不同板厚情况箱型板结构的等效应力最大值，是剔除应力奇异点处的等效应力峰值后的最大值，随着板厚的增加，结构的刚度增大，等效应力最大值逐渐减小，变形最大值也逐渐减小，不同板厚对结构等效应力值和变形值的减小幅度影响基本接近。板厚小于35 mm箱型板结构的等效应力最大值都大于材料的强度设计值295 MPa^[5]。



a) 25 mm



b) 30 mm

图8 不同板厚箱型板结构的等效应力云图

2.3.3 不同H型钢加劲肋个数的影响

箱型板结构的支承形式采用两端固接，钢板的厚度为35 mm，加劲肋均采用型号为HW230×230×20×20的H型钢，箱型板结构内部分别加1~4个加劲肋（表3）。

表3 加不同加劲肋个数箱型板结构的应力和变形

| 加劲肋个数 | 等效应力 | | 变形 | |
|----------------|-------------|--------------------------|------------|------------------------|
| | 最大值/ MPa | 与加4个肋结 构等效应力最 大值之比 | 最大值/ mm | 与加4个肋结 构变形最大 值之比 |
| 1个(间距2.465 m) | 379 | 1.285 | 253 | 1.110 |
| 2个(间距1.643 m) | 338 | 1.146 | 238 | 1.044 |
| 3个(间距1.2325 m) | 313 | 1.061 | 233 | 1.022 |
| 4个(间距0.986 m) | 295 | 1.000 | 228 | 1.000 |

计算结果如图4和6所示，加不同肋数箱型板结构的等效应力和变形分布趋势基本一样，只是具体数值不同。表3中不同板厚情况箱型板结构的等效应力最大值，是剔除应力奇异点处的等效应力峰值后的最大值，随着加劲肋个数的增加，结构的等效应力和变形最大值均会减小，两者减小的幅度逐渐变缓。加肋个数少于4个的箱型板结构的等效应力最大值都大于材料的强度设计值295 MPa^[5]。

2.3.4 不同型号H型钢加劲肋的影响

箱型板结构的支承形式采用两端固接, 钢板厚度为 35 mm, 空心板内加 4 个同一型号的加劲肋, 分别选用 4 种不同型号的 H 型钢: HW230 × 230 × 20 × 20, HW230 × 230 × 10 × 20, HW230 × 230 × 10 × 15 和 HW230 × 180 × 10 × 20, 讨论其对结构应力和变形的影响。

计算结果如图 4 和 9 所示。加不同型号 H 型钢加劲肋的箱型板结构等效应力和变形分布趋势基

本一样。表 4 中不同板厚情况箱型板结构的等效应力最大值, 是剔除应力奇异点处的等效应力峰值后的最大值, 增大 H 型钢腹板厚度, 可以明显减小结构的最大等效应力; 改变 H 型钢的翼缘厚度和宽度, 对结构的最大等效应力影响不大。不同型号的 H 型钢加劲肋对结构的变形影响不大。箱型板加 4 个 HW230 × 230 × 20 × 20 型号的 H 型钢加劲肋, 结构的等效应力最大值为 295 MPa, 满足材料的强度设计值要求。

表 4 加不同型号 H 型钢加劲肋箱型板结构的应力和变形

| 不同加劲肋型号 | 等效应力 | | 变形 | |
|-----------------------|---------|---|--------|---------------------------------------|
| | 最大值/MPa | 与加 HW230 × 230 × 20 × 20 加劲肋结构等效应力最大值之比 | 最大值/mm | 与加 HW230 × 230 × 20 × 20 加劲肋结构变形最大值之比 |
| HW230 × 230 × 20 × 20 | 295 | 1.000 | 228 | 1.000 |
| HW230 × 230 × 10 × 20 | 313 | 1.061 | 231 | 1.013 |
| HW230 × 230 × 10 × 15 | 317 | 1.075 | 233 | 1.022 |
| HW230 × 180 × 10 × 20 | 316 | 1.071 | 233 | 1.022 |

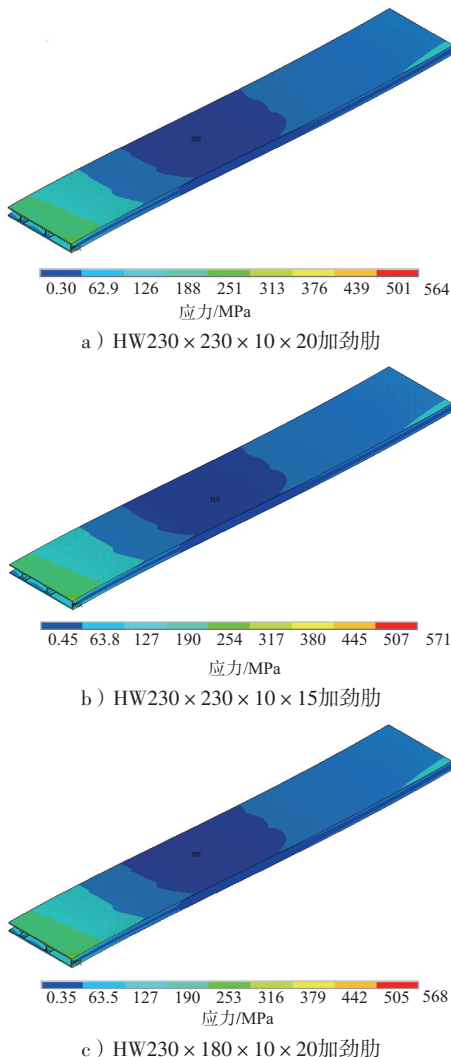


图 9 加不同加劲肋箱型板结构等效应力云图

3 双层水平板式防波堤结构箱型水平板传统计算方法分析

3.1 箱型板结构的计算

双层水平板式防波堤的上下 2 块水平板的两端固接在横梁上, 受到波浪力的作用, 水平板采用钢制箱型板结构, 箱型板的计算简图可简化为两端固定梁的受力情形。箱型板结构的受力弯矩图如图 10 所示。

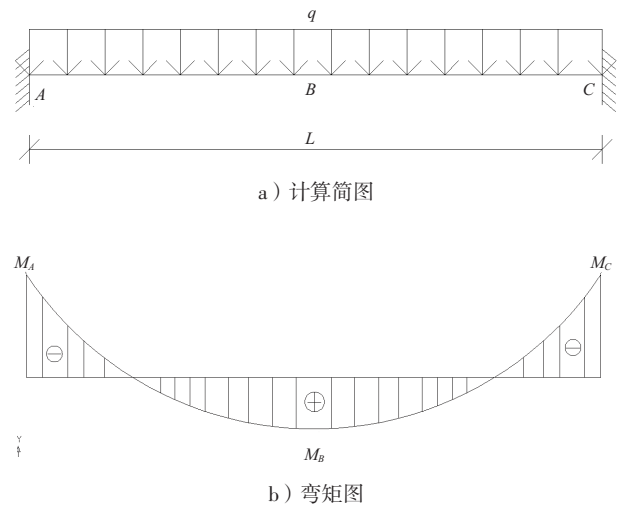


图 10 箱型板结构的受力弯矩示意

单块箱型板的设计尺寸为: 长 $L=30$ m, 宽 $B=5$ m, 高 $h=0.3$ m; 钢板厚 $d=35$ mm, 空心板内加

4个同一型号为HW230×230×20×20的H型钢加劲肋,箱型板结构断面见图11。

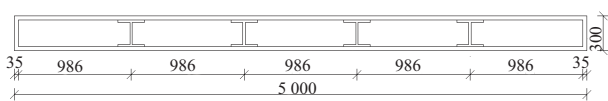


图11 箱型板结构断面(单位: mm)

q 为沿板跨度方向的线分布荷载,波浪线分布荷载 $q_1=115.125$ kN/m,假设箱型板自重是均匀分布的,自重线分布荷载 $q_2=32.164$ kN/m,箱型板结构线分布荷载总和 $q=q_1+q_2=147.289$ kN/m。

固端弯矩

$$M_A = M_C = -\frac{1}{12}ql^2 = -11046.675 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

中间弯矩

$$M_B = \frac{1}{24}ql^2 = 5523.338 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

最大弯矩出现在板的两端支座处 $M_{\max}=M_A=M_C$,计算出箱型板截面的惯性矩 $I_z=6.703 \times 10^{-3} \text{ m}^4$, $y_{\max}=h/2=0.15$ m,最小抗弯截面系数 $W_{\min}=I_z/y_{\max}=4.469 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 。

3.2 箱型板结构传统方法计算结果并与有限元方法比较

根据上述的计算分析可以看出,简化为两端固定梁的箱型板,主要承受弯矩作用。弯曲最大正应力的强度条件

$$\sigma_{z\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma]$$

最大弯曲应力值

$$\sigma_{z\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\min}} = 247.184 \text{ MPa}$$

极值点出现在箱型板两端侧面的上下2条边上。

因传统计算方法把三维空心箱型板结构简化为二维实心梁计算,故求得的应力与有限元法相比较有一定的差异,采用ANSYS有限元软件计算的结果为295 MPa,使用传统方法计算的结果为247.184 MPa。两种方法计算求得的最大弯曲应力点都出现在箱型板两端侧面的上下2条边上。

4 结语

1) 根据文献[3],应用ANSYS有限元软件,综合考虑了不同支承形式、不同钢板厚度、不同H型钢加劲肋个数和型号等因素对水平板应力和变形的影响,系统分析了钢制箱型板的结构形式和受力特性,拓宽了ANSYS在水工结构物计算分析的应用范畴。

2) 双层水平板式防波堤的上下两块水平板采用钢制箱型板结构,该结构两端固接,长30 m,宽5 m,高0.3 m,钢板薄壁厚35 mm,加4个HW230×230×20×20型号加劲肋,在波浪荷载作用下仍处于安全范围内,在使用过程中,结构破坏最有可能发生在箱型板两端侧面的4个角点上,可以考虑在4个角上局部加强,达到结构正常使用要求。

3) 对比有限元方法和传统计算方法,有限元法的优点在于较全面准确地反映结构应力和变形情况,并得出较可靠的结果。传统计算方法的优点在于可以分析某些具体参数(如截面的中性轴位置、截面抗弯系数等)的变化对结构计算结果的影响。

4) 对双层水平板式防波堤结构的工程应用做出了探索,取得了一些初步成果,计算结果可用于结构设计参考。但还有很多问题有待进一步研究,如箱型板结构几何尺寸的优化、箱型板在长期波浪荷载作用下的动力响应和疲劳破坏问题等。

参考文献:

- [1] Usha R, Gayathri T. Wave motion over a twin-plate breakwater[J]. Ocean Engineering, 2005(32): 1054-1072.
- [2] Neelaman S, Gayathri T. Wave interaction with twin plate wave barrier [J]. Ocean Engineering, 2006(33): 495-516.
- [3] 谷文强,张宁川. 双层水平板型防波堤水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [4] 合田良实. 构造物に動く波力[C]// 1967年度水工学に関する夏期研修会议议文集, 1967.
- [5] JTJ 283—1999 港口工程钢结构设计规范 [S].

(本文编辑 郭雪珍)