



新型多孔结构不同开孔前墙 在波浪作用下的受力分析

石然, 葛晓丹, 唐超瞻

(中交第四航务工程勘察设计院, 广东 广州 510290)

摘要: 针对在地形限制条件下常规直立式护岸在波浪作用下前墙反射严重、直立式沉箱结构前墙配筋量和混凝土用量较大导致不经济等问题, 进行不同开孔结构在波浪作用下的试验研究以及前墙弯矩内力分布计算。采用波浪物理模型试验和有限元数值模拟分析方法, 得到波浪压强以及结构前墙内力分布。结果表明, 新型多孔结构可有效减小波压力, 避免严重的波浪反射叠加作用, 同时前墙只承受部分波浪力作用, 由此产生的内力和变形均较小, 此趋势在一定范围内与开孔增加呈正相关。可优化多孔结构前墙构件的配筋以达到经济效果。

关键词: 波浪物理模型试验; 护岸; 新型多孔结构; 有限元分析

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0067-07

Force of front wall of new porous structure with different openings under wave action

SHI Ran, GE Xiaodan, TANG Chaozhan

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The conventional vertical revetment faces a serious reflection of the front wall subject to wave action under the topographic restrictions, and the vertical caisson structure is uneconomical due to a large amount of reinforcement and concrete used in the front wall. In order to solve these problems, this paper carries out experimental research on different structures with openings under the wave action and calculates the bending moment distribution of the front wall. The paper uses the physical wave model experiment and finite element numerical simulation analysis to obtain the distribution of wave pressure and internal force of the front wall of the structure. The results show that the new porous structure can effectively reduce the wave pressure and avoid serious wave reflection superposition. At the same time, the front wall is only subject to part of the wave force, resulting in small internal force and deformation, and this trend is positively related to the increase in openings within a certain range. The reinforcement of the front wall component of the porous structure can be optimized to achieve economic results.

Keywords: physical wave model experiment; revetment; new porous structure; finite element analysis

护岸按结构形式可分成斜坡式护岸、直立式护岸和混合式护岸 3 种^[1]。开孔沉箱结构属于直立式的一种, 常用于波浪较大的海域, 其具有能降低结构物前的波浪反射、减小结构物所受的波浪力、降低工程造价等特点。

当护岸采用新型大开孔混凝土空箱消浪结构时, 与开孔沉箱结构类似, 其特点是将其海

侧外壁一定范围内从上到下开孔, 使内舱格成为消能室, 作用是减少墙前反射波、冲击波压力和越浪引起的传递波等, 大型开孔沉箱常用于深水防波堤。关于开孔结构的波浪力及反射系数计算已有一些研究成果, 如夏志盛^[2]研究开孔沉箱消浪室的反射系数与消浪室相对宽度的关系, 得出增大开孔板的开孔率可以降低明

收稿日期: 2022-09-15

作者简介: 石然 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程水工结构设计。

基床上开孔沉箱的反射系数的结论，并分析开孔对消浪的作用；唐蔚^[3]得出在不规则波浪与开孔沉箱作用过程中，结构受到的总水平波浪力峰值明显大于谷值，并应将总水平波浪力的峰值作为该结构设计的控制荷载的结论；周卓炜^[4]发现竖直墙上最容易受明显冲击的部位位于静水位附近；李雪野等^[5]发现开孔沉箱比不开孔沉箱能够显著降低平均越浪量；蔡郁^[6]分析开孔率对波浪反射系数的影响规律。但以上研究均为对波浪作用本身或是对结构开孔率消波效果的研究，尚未对开孔以及波浪组合作用下结构本身的受力情况进行分析。故本文通过波浪物理模型试验和有限元数值模拟分析比较3种不同开孔大小的新型多孔结构的前墙在相同重现期波浪作用下的受力差异，为类似的工程结构设计提供参考，也可对更多不同样式开孔以

及结构开孔优化等后续研究提供一些借鉴。

1 工程概况及结构形式

工程地处山东省南侧岸线，工程区波浪较大，既有局部海域的风浪影响，也受到外海传入涌浪的影响。工程区附近海域水深地形多变，海岸类型东侧为基岩海岸，水上、水下地形陡峭，湾顶浅滩部分地形较缓，近岸波浪传播复杂。同时近岸处在波浪作用范围内有国家某实验室，海岸线至该实验室之间的可用陆域宽度有限，此处的护岸工程须保证近岸陆上建筑物不受波浪的直接作用，但近岸处地势较低，后方陆域地势较高，大型预制结构、大型吊运设备等均难以进入现场。

针对上述特点,本工程采用了新型直立式大开孔混凝土空箱消浪结构(简称新型多孔结构),见图1。

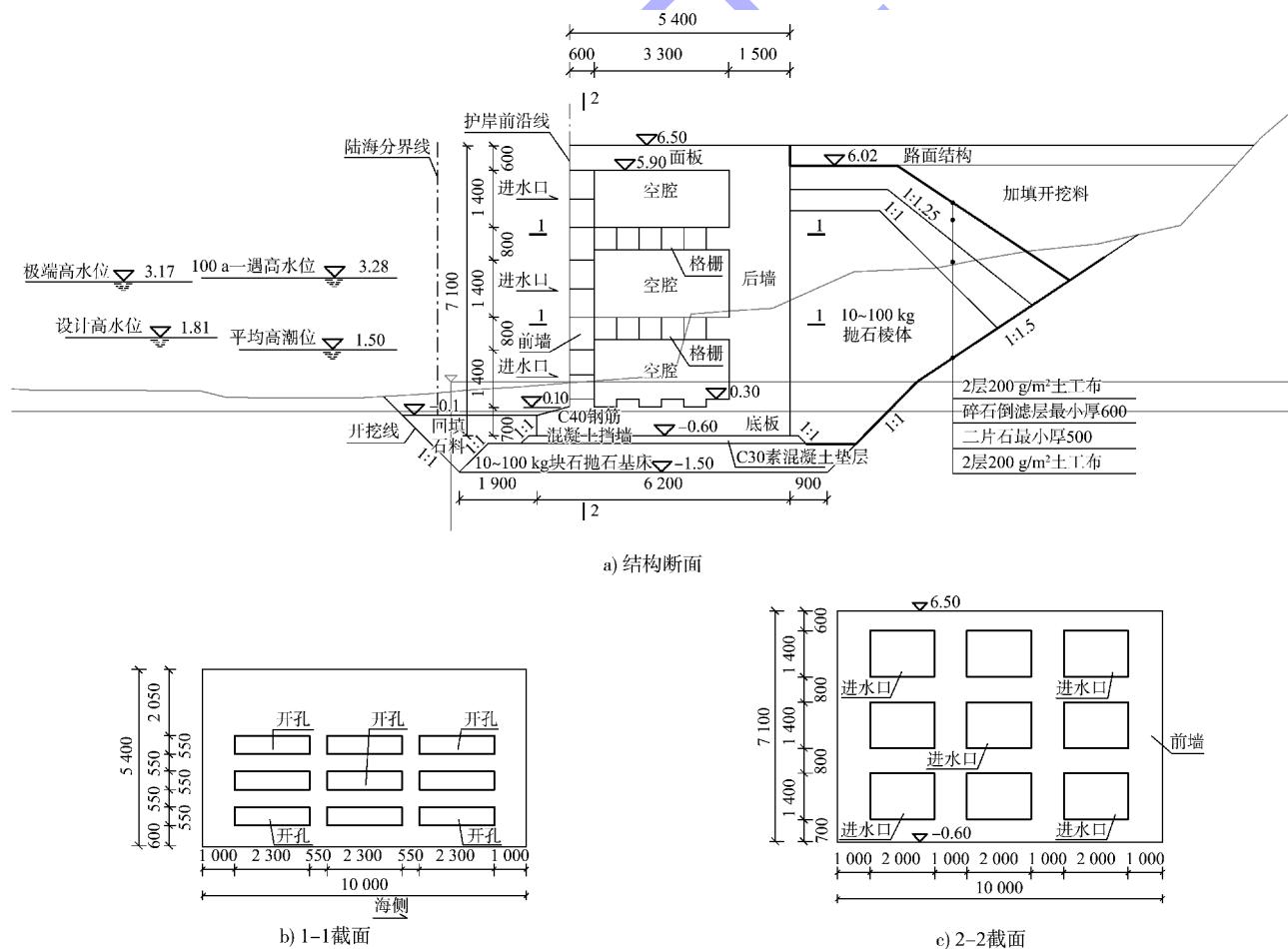


图 1 新型多孔结构 (尺寸: mm; 高程: m)

新型多孔结构顶高程为 6.50 m(国家 85 高程基准面),底板厚度为 0.7 m,后壁厚度为 1.5 m,单个多孔结构沿护岸长度方向为 10 m,前壁开 9 个 2.0 m×1.4 m(长×宽)的矩形孔洞。内部设置 2 排水平消浪格栅,将空箱内空间分隔为 3 个消浪池。

2 新型多孔箱形结构波浪物理模型试验

为验证本结构的消浪效果,对结构方案进行波浪断面物理模型研究。断面试验在大波浪水槽中进行,大波浪水槽长 60 m、宽 1.8 m、高 1.6 m,并配有风、波、流设备。水槽的两端配有关流缓坡,在一端配有丹麦水工研究所生产的推板式不规则波造波机,并安装了二次反射波浪吸收装置。波浪模拟控制系统为丹麦水工研究所生产的 AWACS2 造波及二次反射波浪吸收控制系统,该造波系统可根据需要产生规则波及不同谱型的不规则波,并能够消除造波机推波板造成波浪二次反射影响。试验按照 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[7]相关规定,采用正态模型,按照弗劳德数相似律设计。根据设计水位、波浪要素、试验断面及试验设备条件等因素,模型几何比尺 λ_l 取 1:20,时间比尺 $\lambda_t = \lambda_l^{1/2}$,质量比尺 $\lambda_m = \lambda_l^3$,单宽流量比尺 $\lambda_q = \lambda_l^{3/2}$,压强比尺 $\lambda_p = \lambda_l$ 。

对正面不同开孔大小情况分别进行试验,开孔大小包括原设计开孔大小、一半开孔大小及不开孔 3 种工况。其中全开孔为混凝土空箱迎浪面按原设计进行开孔;半开孔为混凝土空箱迎浪面按原设计各孔一半大小进行开孔;不开孔为混凝土空箱迎浪面不设开孔。进行波浪压强试验时,在直立式混凝土空箱结构迎浪面内外侧分别安装压力传感器(从上至下 5 个测点分别为 $A_1 \sim A_5$),同步测量压力过程。

物理模型试验揭示,新型多孔结构在 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪作用下,波浪传播至近岸,水深变浅,波浪变形并发生破碎,部分波浪在直立式混凝土前破碎后,破碎水体直接冲击到混凝土空箱迎浪面,破碎后水体在迎浪面上跃起形成越浪。在 100 a 一遇高水位(3.28 m)+100 a 一遇波浪($H_{13\%} = 3.22$ m、平均周期 $T_m = 13.5$ s)作

用下,波列中大波在直立式混凝土空箱护岸前破碎,或以临破形态冲击空箱结构,对空箱冲击较大,在全开孔、半开孔和不开孔 3 种工况条件下迎浪面最大正压力分别为 79.5、82.4、109.3 kPa。各工况波浪压力分布见图 2。可以看出,对于开孔结构而言最大波压力发生在 A_3 测点,而不开孔结构最大波压力发生在 A_2 测点,结构的开孔设置使得波浪力的分布发生变化,静水位以上的波浪力分布更均匀。模型试验同时揭示,3 种模型的稳定性均满足要求。

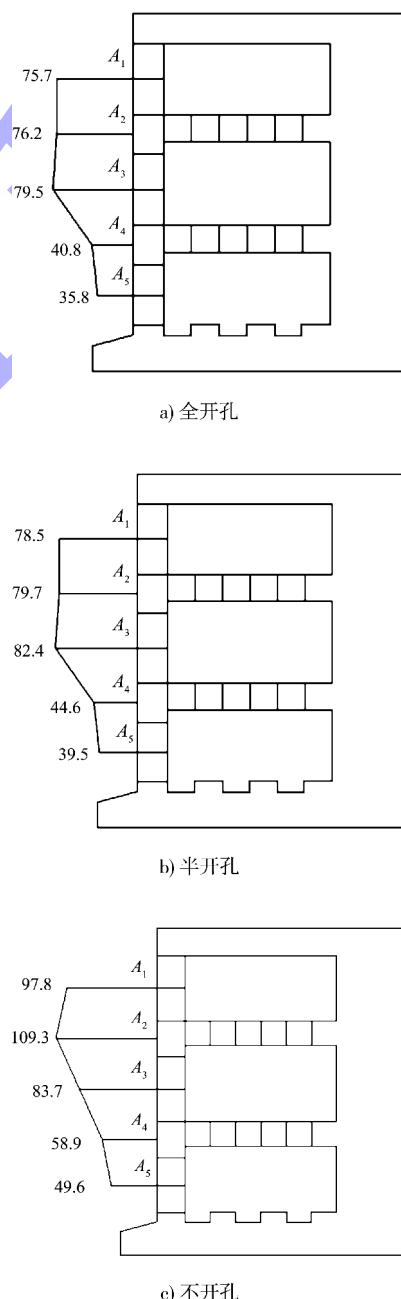


图 2 新型多孔结构最大波压力分布 (单位: kPa)

3 新型多孔箱形结构前墙受力数值分析

本文通过大型有限元分析软件 ANSYS 分别建立全开孔、半开孔、不开孔 3 个有限元模型在 100 a 一遇极端高水位和 100 a 一遇波浪作用下的内力结果, 比较不同结构的内力差异。有限元模型见图 3。

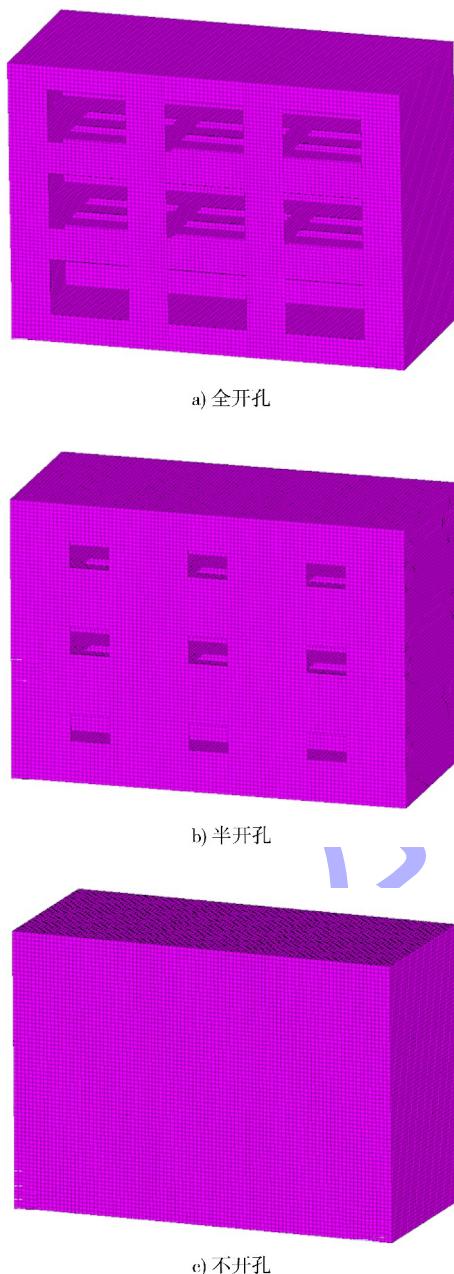


图 3 新型多孔结构三维有限元模型

根据数值模拟计算结果, 得到新型多孔结构前墙弯矩分布如图 4~6 所示。由图 4 可知, 全开孔多孔结构弯矩最大位置发生在波压力最

大处附近, x 方向最大正、负弯矩分别为 28.51、-34.00 kN·m/m, y 方向最大正、负弯矩分别为 65.91、-74.22 kN·m/m; 由图 5 可知, 半开孔多孔结构弯矩最大位置发生在波压力最大处附近, x 方向最大正、负弯矩分别为 51.21、-105.96 kN·m/m, y 方向最大正、负弯矩分别为 123.48、-98.23 kN·m/m; 由图 6 可知, 不开孔多孔结构弯矩最大位置发生在波压力最大处附近, x 方向最大正、负弯矩分别为 44.10、-66.55 kN·m/m, y 方向最大正、负弯矩分别为 91.85、-144.41 kN·m/m。

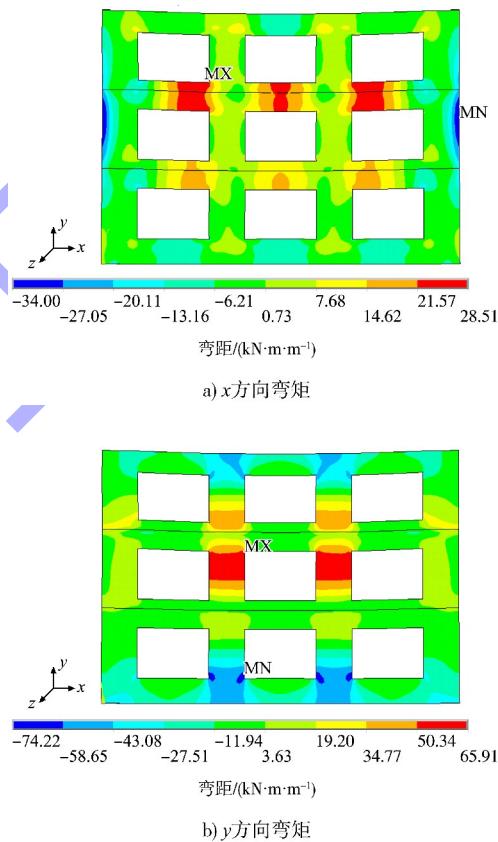
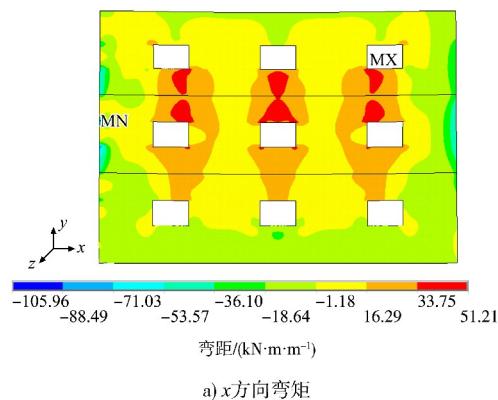


图 4 全开孔多孔结构弯矩云图



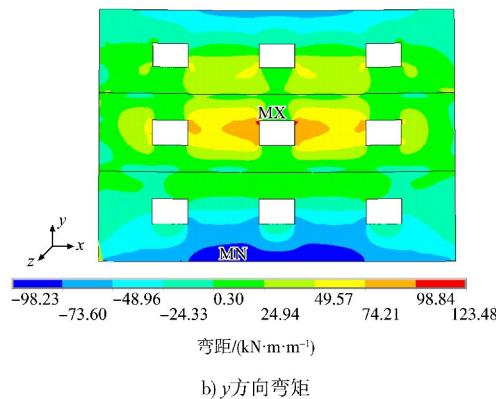


图5 半开孔多孔结构弯矩云图

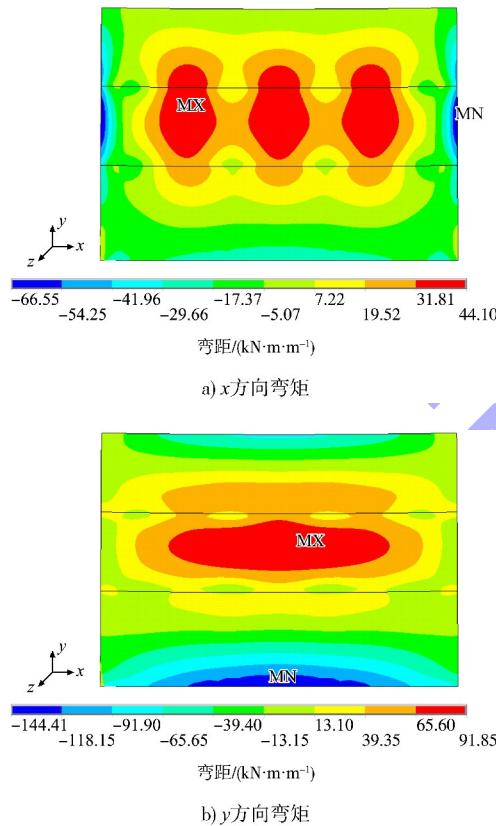


图6 不开孔结构弯矩云图

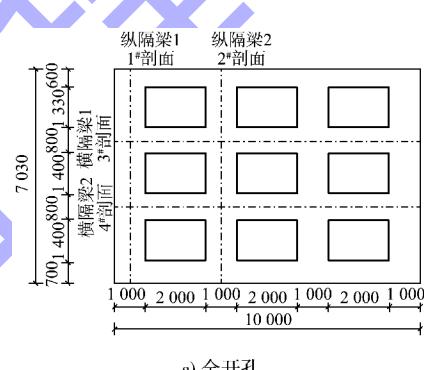
分别对3种不同结构在4个剖面处(图7)的弯矩进行比较分析,可得出3种不同结构在相同重现期波浪力作用下的弯矩分布曲线,见图8。

通过分析上述结构受力的结果,可得出:

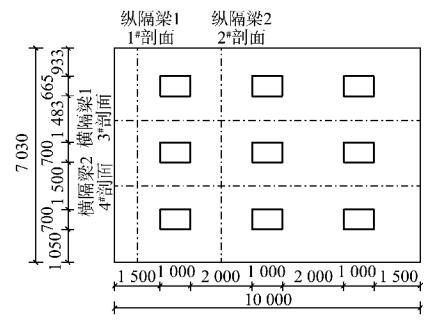
- 1) 对于1个纵隔梁而言(对应1[#]、2[#]剖面),总体趋势为结构的顶部和底部均出现了负弯矩,且不开孔的结构负弯矩最大,半开孔次之,全开孔最小,在结构中部的正弯矩区,也是相同趋势,不

开孔结构正弯矩最大,半开孔次之,全开孔最小。同时根据波浪物理模型试验也可得出全开孔的波浪作用下结构所受波浪力最小。3个结构相比较而言,开孔最大的结构在相同重现期的波浪作用下所受的波浪力荷载最小,同时结构产生的弯矩也最小,因此可以在一定程度上节省开孔结构前墙的配筋。

2) 对于2个横隔梁而言(对应3[#]、4[#]剖面),弯矩的分布较为均匀,且可以看出对应3[#]剖面的上横隔梁由于波浪压力不同,相比4[#]剖面产生了较大的弯矩,但是总的的趋势依然和纵隔梁一致,不开孔的结构波浪反射明显,波压力大,前墙产生更大的弯矩,半开孔次之,全开孔的结构在波浪作用下产生的弯矩也最小。



a) 全开孔



b) 半开孔

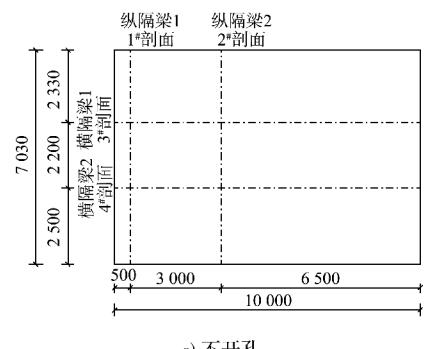


图7 4个剖面位置 (单位: mm)

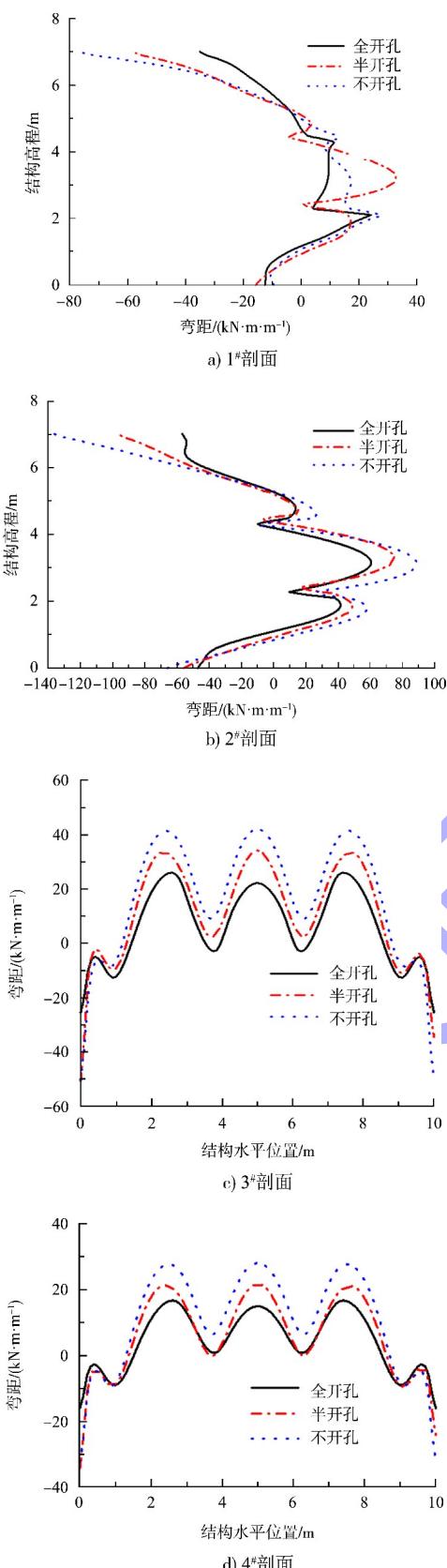


图 8 4 个剖面的弯矩分布对比

4 新型多孔箱形结构前墙变形数值分析

根据数值模拟计算结果, 得到新型多孔结构

前墙最大变形如图 9 所示。可以看出, 3 种结构在波浪作用下, 水平向最大变形发生在结构中间位置, 垂直向最大变形发生在波浪最大波压力作用点位置, 发生的最大变形为垂直于前墙方向的变形, 全开孔、半开孔、不开孔结构的最大变形分别为 0.58、0.79、1.02 mm。

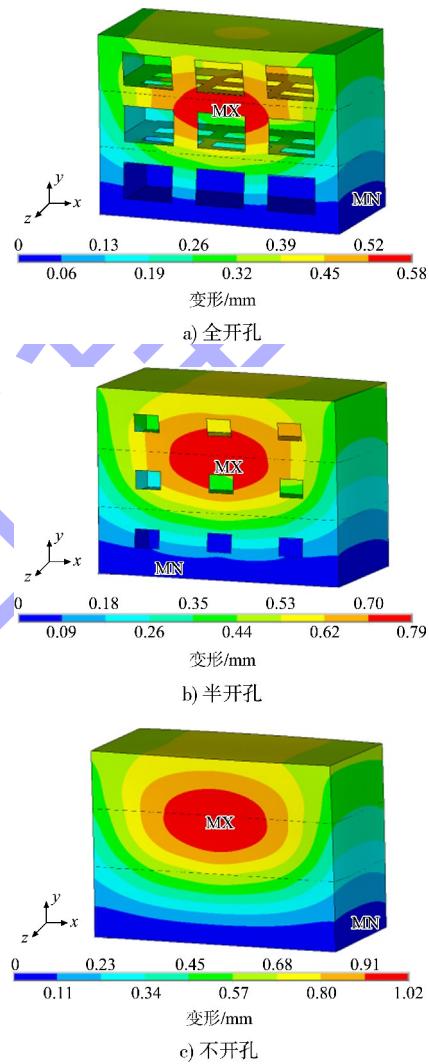


图 9 3 种结构在波浪力作用下最大变形

通过分析比较 3 种不同结构在波浪力作用下前墙的变形大小, 由于不开孔结构完全承受波浪作用, 产生的变形最大, 前墙产生的内力也最大, 波浪反射严重, 前墙承受所有的波浪力作用。而开孔最大的原设计断面, 由于开孔的设置, 波浪有一部分进入箱形结构中间的消浪池中, 作用在前墙的力相对减少, 前墙只承受部分波浪力作用, 且开孔越大波浪力和内力、变形均越小, 可发现此趋势在一定范围内与开孔大小的增加呈正相关。

5 结语

1) 根据物理模型试验的结论, 新型多孔结构的大开孔设置在波浪作用下可有效减小波压力, 同时使水位以上波浪力的分布相比常规直立式结构更加均匀, 避免了常规直立式结构严重的波浪反射叠加作用。

2) 在波浪力作用方面, 由于多孔结构的作用, 使得波浪破碎, 迎浪面的最大正压强相比于半开孔、不开孔结构均大幅减小, 构件受力更小, 变形更小。由于开孔的设置, 波浪有一部分进入箱形结构中间的消浪池中, 作用在前墙的力相对减少, 前墙只需要承受部分波浪力作用, 由此产生的内力和变形均较小, 此趋势在一定范围内与开孔大小的增加呈正相关。因此可根据此趋势, 将开孔增大到一定范围内, 可优化多孔结构前墙纵横隔梁构件的配筋。根据物理模型试验, 三者均满足稳定性要求, 全开孔结构前墙所用混凝土及钢筋数量均最少, 可一定程度降低结构总造价。

3) 本工程新型多孔结构已应用于青岛某生态岸线整治工程, 由于开孔消浪的设置, 未来在其

(上接第 24 页)

4 结论

1) 当堤顶高程与水位接近、入射波高较大时, 堤顶存在越浪, 透射波高由越浪和透浪两部分叠加组成, 斜挡浪板挡浪效果较好。

2) 堤后透射系数随着水位的增加而逐渐减小; 小波高、长周期作用大于大波高和短周期。

3) 在不同水位及波浪作用下, 挡浪板结构受力较均匀, 结构迎浪侧和底部最大压强测点均在静水位附近, 挡浪板薄弱点为转折点位置, 设计应加强区域配筋。

4) 斜挡浪板透空式防波堤的消浪性能良好, 与传统透空式防波堤相比, 能够有效折减冰荷载作用, 适应北方近岸使用。斜挡浪板透空式防波堤丰富了传统桩基透空式防波堤应用范围, 能为桩基透空式防波堤在冰冻区的实际应用提供参考。

参考文献:

[1] 邱大洪, 王学庚. 深水薄板式防波堤的理论分析 [J]. 水运工程, 1986(4): 8-12.

他波浪条件复杂的近岸亲水防浪建筑物中有更广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 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 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] 夏志盛. 波浪与明基床上开孔沉箱的相互作用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

[3] 唐蔚. 不规则波与开孔沉箱作用的数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

[4] 周卓炜. 多室开孔沉箱的波浪冲击及反射研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

[5] 李雪野, 付超, 陈际丰. 沉箱开孔对平均越浪量的影响 [J]. 水运工程, 2018(7): 81-84.

[6] 蔡郁. 开孔率对明基床上开孔沉箱波浪反射系数影响的数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

[7] 交通运输部水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

(本文编辑 王璁)

[2] 张万威, 陈国平, 严士常, 等. 单挡板桩基透空堤的透浪系数物理模型试验 [J]. 水运工程, 2022(6): 9-16, 28.

[3] 诸裕良, 李雨, 陈德春, 等. 高桩挡板透空式防波堤消浪性能数值研究 [J]. 海洋工程, 2015, 33(4): 53-62, 78.

[4] 范骏, 王宇楠, 杨斯汉, 等. 双挡板透空堤透浪与反射系数实验研究 [J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 60-67.

[5] 冯卫兵, 丁文林, 叶小红. 桩基挡板透空式防波堤透浪特性研究 [J]. 水运工程, 2014(3): 62-67, 79.

[6] 王国玉, 王永学, 李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6): 865-870.

[7] 范平, 李金宣, 柳淑学, 等. 双层开孔斜挡板透空式防波堤消浪性能研究 [J]. 水运工程, 2020(7): 7-12.

[8] 潘春昌, 王国玉, 任冰, 等. 圆弧板透空式防波堤消波性能试验研究 [J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 33-40.

[9] 朱浩, 朱恩宗, 郑天立. 梳式透空防波堤机理特点及掩护效果 [J]. 水运工程, 2001(10): 31-34.

[10] 房卓, 张宁川, 贲志鹏. 透空式梳式防波堤的数值模拟和波浪透射系数的研究 [J]. 水道港口, 2011, 32(2): 86-93.

(本文编辑 王传瑜)