



圆弧曲面复式箱舱防波堤结构的 开孔率与填充率研究

史奔骏¹, 薛海亮², 张日向¹

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 2. 大连泛海建设投资有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用不规则波浪试验, 研究了一种新式异型防波堤——圆弧曲面复式箱舱防波堤的水力特性以及堤上不同部位波力随箱舱结构主要影响因素的变化规律, 得出在试验工况条件下适宜的圆弧曲面开孔率、舱箱顶板开孔率以及箱内碎石填充率, 为实际工程提供参考数据与建议。

关键词: 防波堤; 开孔率; 填充率; 受力特性; 波浪力

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0059-08

Opening ratio and filling ratio of double-chamber breakwater with circular curved surface

SHI Ben-jun¹, XUE Hai-liang², ZHANG Ri-xiang¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Dalian Oceanwide Real Estate Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: This paper studies a new-style breakwater with double-chambers and circular curved surface under the action of irregular waves, from both its hydraulic characteristics and the regulations of the wave pressure on different parts of the structure changing with different factors. Through the experiment, this paper concludes the optimum opening ratio and filling rate of the structure to provide a reference for practical engineering.

Keywords: breakwater; opening ratio; filling ratio; hydraulic characteristics; wave pressure

防波堤因其防御外海波浪、保护水工建筑物的功能而在港口工程中具有特殊地位。近年来, 海上人工岛的广泛开发应用等, 不断要求重新估价防波堤的功能和建设费用, 探求合理、可靠的结构形式和切实可行的施工方法, 并降低造价以保证新型结构防波堤的使用功能, 发展与此相应的海岸与港口工程, 已为世界各国港口工程界所重视^[1-2]。

本文研究的异形防波堤结构——圆弧曲面复式箱舱防波堤(图1), 是依据综合纵狭缝式吸能堤的消波机能和削角堤低波力特性而设计的一种1/4沉箱圆弧曲面壁间与半空沉箱舱相结合的双空腔消浪结构。堤身的内部形成消浪室, 在减小反

射波的同时, 具有减少冲击破碎波压对堤体作用的性能。圆形堤面的波浪压力的作用方向均指向圆心, 对堤身只产生较小倾覆力矩, 且堤身采用半空沉箱, 地基负荷较小, 堤身断面较传统直立式防波堤更为经济。研究表明, 影响此类防波堤水力特性的因素, 有波高、相对水深 d/L , 相对堤高 h_c/H 和波长等, 结构本身构造(如开孔率等)也有一定影响^[3]。目前, 针对该结构形式防波堤工作机理的研究较少, 尚无成熟的计算理论和方法, 所以在实际应用中模型试验成为结构设计的重要辅助手段。为此结合项工程试验, 针对这一新型混合堤自身构造对波力的影响进行比较系统

收稿日期: 2014-08-08

作者简介: 史奔骏(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口水工建筑物与波浪的相互作用等。

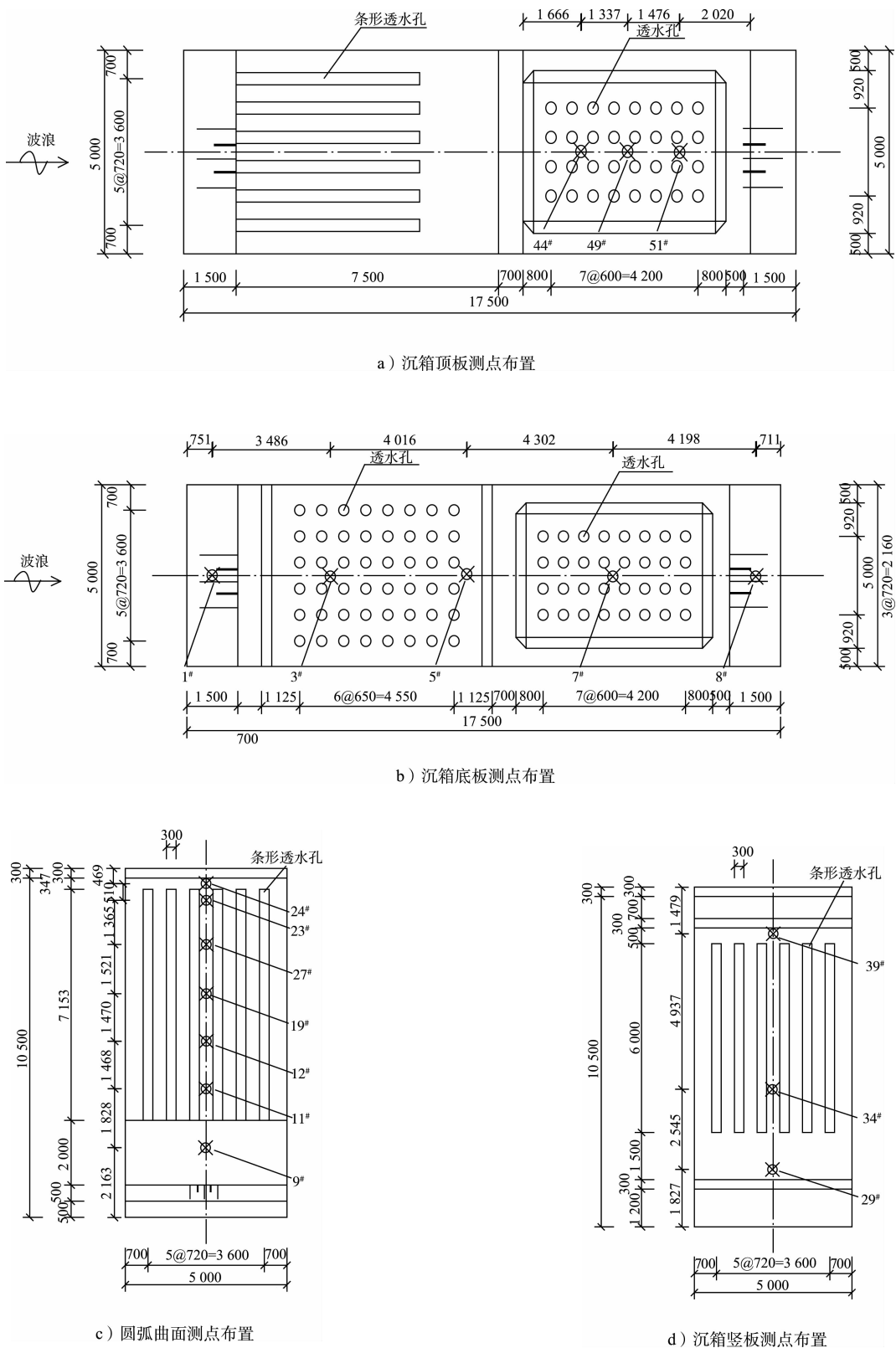


图 3 沉箱测点布置 (图中尺寸均为原型值, 单位: mm)

1.2 试验组次和试验方法

试验波浪采用不规则波浪, 模拟国际上通用的 JONSWAP 谱 ($\gamma = 3.3$)。为了检验沉箱构造对

其受力的影响, 试验中模拟原型波高 3.84 m、周期 7.5 s, 分别改变圆弧曲面开孔率、沉箱顶板开孔率以及箱内填充率 3 个因素, 测量各种情况下

波力值。由于堤体沉箱相对于静水面的位置对其受力分布影响较大，故设置不同水深对照试验。表1列出主要的试验组次。

放置模型前，于水槽内堤轴线处测定原始波要素。点压力测量系统出厂前已进行了率定。所有试验重复进行3遍，结果取其均值。

表1 主要试验组次

影响因素	组次号	水位水深/m	波高/m	周期/s	沉箱顶板开孔率/%	圆弧曲面开孔率/%	沉箱填充率/%	沉箱竖板开孔率/%	沉箱底板开孔率/%
沉箱顶板开孔率	4-1	极高 15.99	3.84	7.5	2.31	30	70	30	2.9
	4-2				1.69				
	4-3				1.09				
	4-8				0				
沉箱填石率	5-1	设高 15.17	3.84	7.5	2.31	30	70	30	2.9
	5-2						43		
	5-3						58		
	5-5						0		
圆弧面开孔率	6-1	设高 15.17	3.84	7.5	2.31	30	70	30	2.9
	6-2					21			
	6-3					15			
	6-7					0			
	6-4					30			
	6-5					21			
6-6	15								

注：沉箱顶板底板、底板开孔率为开孔面积与全板面积（外边）之比；圆弧面与竖板竖缝开孔下至极端低水位以下0.67 m、上至极端高水位以上1.31 m和0.21 m（缝的垂向高度分别为7.1 m和6 m），其开孔率计算为总缝宽与堤体横向长度之比。

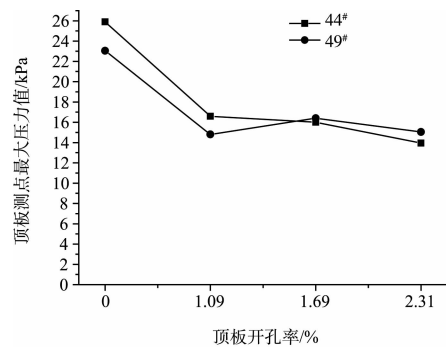
2 试验结果分析

编写程序处理点压力数据文件，得出每个测点在整个波浪作用过程中所采集到的最大点压力值，分析不同部位波压力受到不同因素的影响。

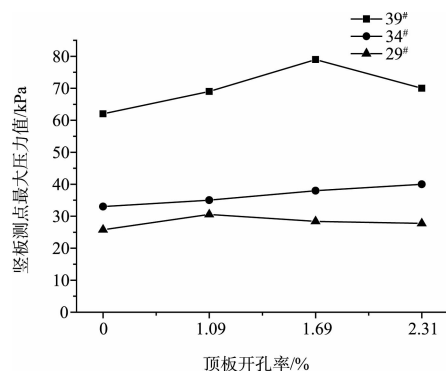
2.1 沉箱顶板开孔率

针对纵缝式消波沉箱结构形式，从消波性能和波力观点来看，吸能室上部最好是敞开的；从安全稳定使用要求来看，应设上顶板，全封闭顶板时吸能室内的空气压缩，产生升压力，对稳定不利。为减轻升压力作用，沉箱顶板设置少量开孔。

分析主要试验组次4-1、4-2、4-3、4-8这4个不同顶板开孔率结果数据可知，沉箱顶开孔率只对沉箱顶板浮托力有一定的影响，对结构其它部位受力影响不明显。沉箱各部位测点最大压力值与顶板开孔率关系如图4所示。



a) 顶板波压力-顶板开孔率



b) 竖板波压力-顶板开孔率

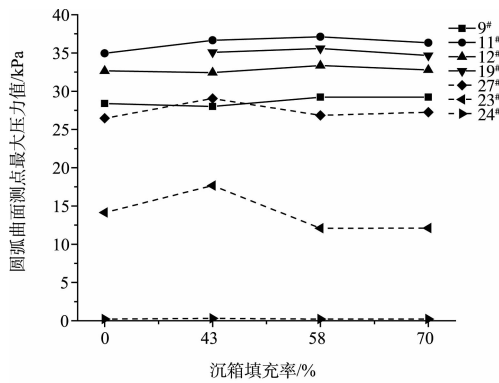
图4 沉箱顶板开孔率影响

从图 4 可知, 沉箱顶板开孔率 1.09% 与完全不开孔相比, 顶板所受浮托力降低近 40%; 开孔率 1.09% ~ 2.31% 变化范围内, 顶板浮托力基本相同且降低很小; 堤体其他结构对此并不敏感。因此, 建议沉箱顶开孔率 1% 左右即可。

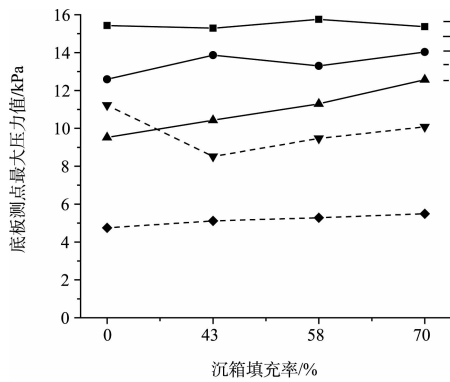
2.2 沉箱内填石高度

对于结构稳定性而言, 预制沉箱堤体中填入碎石越高越好, 但是出于消浪效果、受力合理性以及经济性的考虑, 有必要探究较合理的沉箱填充率。

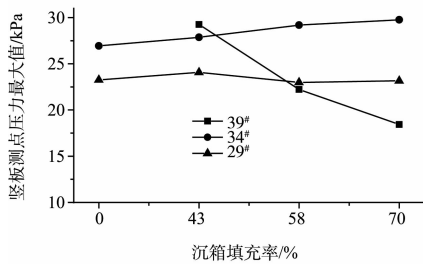
整理试验组次 5-1、5-2、5-3、5-5 这 4 种不同沉箱填充率的试验数据, 其分析结果如图 5 和图 6 所示。



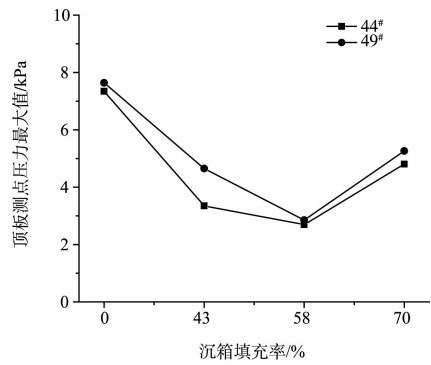
a) 圆弧面波压力-沉箱填充率



b) 底板波压力-沉箱填充率

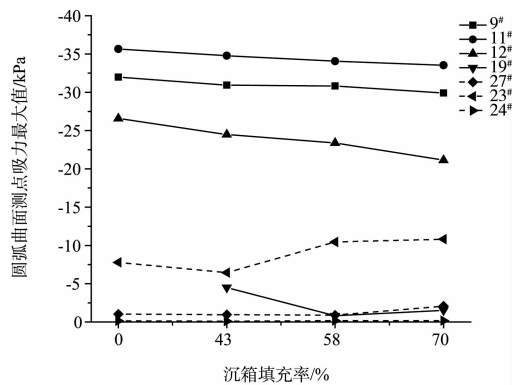


c) 竖板波压力-沉箱填充率

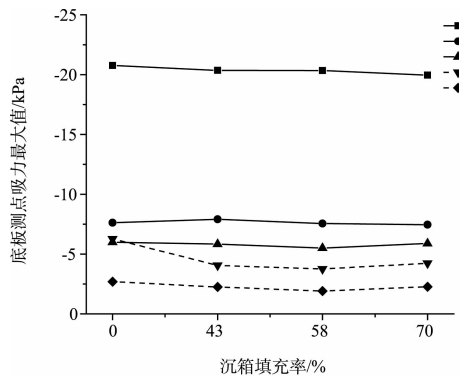


d) 顶板波压力-沉箱填充率

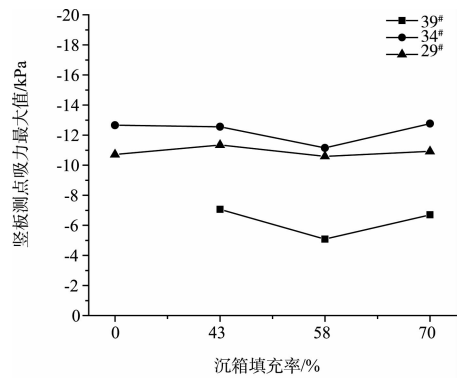
图 5 沉箱填充率影响 (波压力)



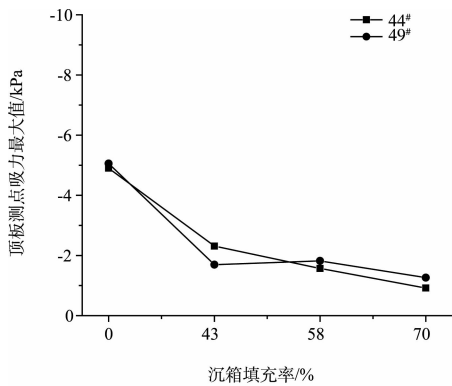
a) 圆弧面波吸力-沉箱填充率



b) 底板波吸力-沉箱填充率



c) 竖板波吸力-沉箱填充率



d) 顶板波吸力-沉箱填充率

图6 沉箱填充率影响 (波吸力)

1) 分析图 5a) 与图 6a) 可知: 在试验所选工况下, 沉箱填充率变化对圆弧曲面测点波压力基本无影响 (虽 23# 与 27# 测点数据随填充率变化有所波动, 可能由于此二测点均在静水面以上附近部位, 溅浪冲击等偶然影响较大), 而填充率对圆弧曲面测点波吸力有一定的影响, 填充率 0 ~ 70% 变化范围内, 静水位以下 3 个测点波吸力有 8% ~ 20% 的降幅。

2) 分析图 5b) 与图 6b) 可知, 试验所选工况下, 随着沉箱填充率 0 ~ 70% 增加, 沉箱底板测点波压力 (对应底板浮托力) 不同位置呈现不同变化趋势: 沉箱前趾 1#、圆弧下方舱底板的 3#、沉箱后趾 8# 波压力基本无明显变化, 而竖直箱前底板处 5# 测点波压力有明显增大的趋势 (增幅 26%), 竖直箱底板中部的 7# 测点压力值在沉箱不填石时较大, 填石后波压力降低 20% 左右。对于底板测点波吸力, 除 7# 点在沉箱不填石时较大之外, 其余测点均无明显变化。

3) 分析图 5c) 与图 6c) 可知, 试验所选工况下, 随着沉箱填充率增加, 沉箱竖板测点波压力不同位置呈现不同变化趋势: 中部、下部的 34# 和 29# 测点压力值变化不明显, 但静水位以上的 39# 测点压力值有明显降低, 降幅近 50%。竖板上测点波吸力在填充率为 58% 时略小一些, 总体变化不明显。

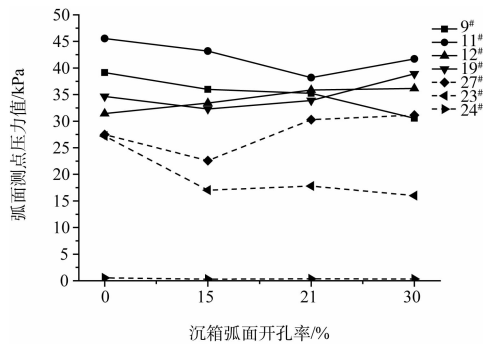
4) 分析图 5d) 与图 6d) 可知, 试验所选工况下, 沉箱填充率在 0 ~ 70% 变化范围内, 顶板测点波压力 (对应顶板所受浮托力) 先下降后增加, 在 58% 处达到最低水平; 顶板波吸力在沉箱未填

石时略大, 填石后大幅减小, 之后随填石高度变化下降不明显。

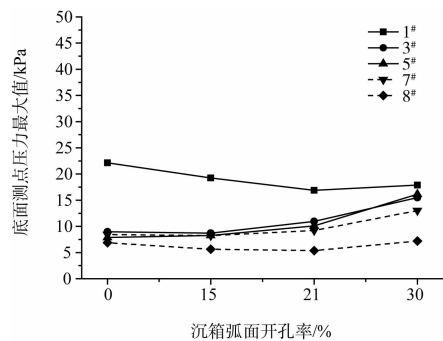
2.3 圆弧曲面开孔率

本论文研究的复式箱舱结构在圆弧面和竖直箱迎浪面均设立竖向狭缝, 试验证明消波效果较好。出于预制施工难易程度以及肋条强度的考虑, 有必要了解圆弧曲面上的波力分布并探究较合理的圆弧曲面开孔率。

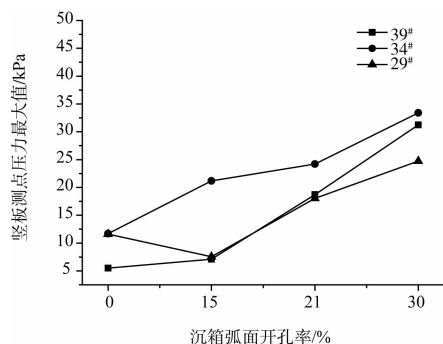
考虑到水深与测点相对位置对垂向波力分布的影响较大, 试验按照设计高水位和设计低水位分别设计了 7 个不同弧面开孔率的 6-1、6-2、6-3、6-7 和 6-4、6-5、6-6 试验组次, 整理试验数据结果如图 7 ~ 9 所示。



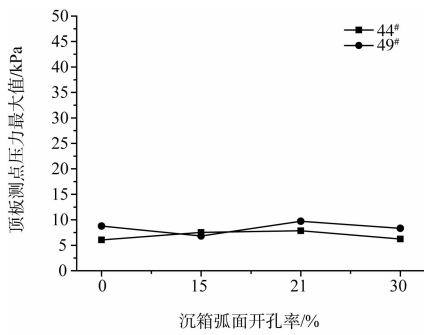
a) 圆弧面波压力-沉箱弧面开孔率



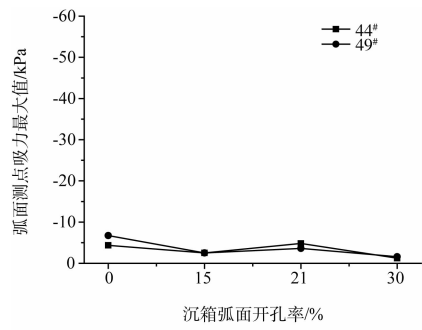
b) 底板波压力-沉箱弧面开孔率



c) 竖板波压力-沉箱弧面开孔率



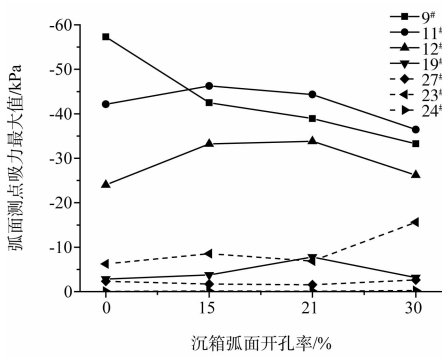
d) 顶板波压力-沉箱弧面开孔率



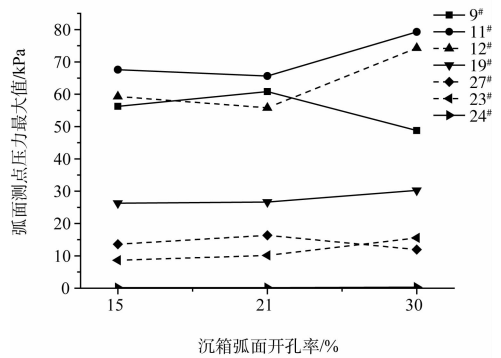
d) 顶板波吸力-沉箱弧面开孔率

图 7 沉箱弧面开孔率影响 (设高水位波压力)

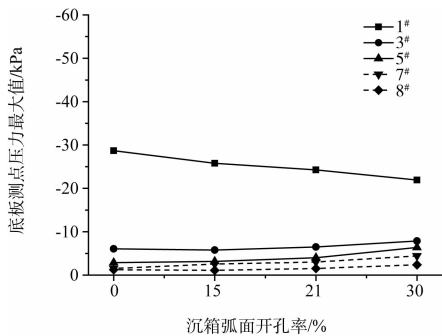
图 8 沉箱弧面开孔率影响 (设高水位波吸力)



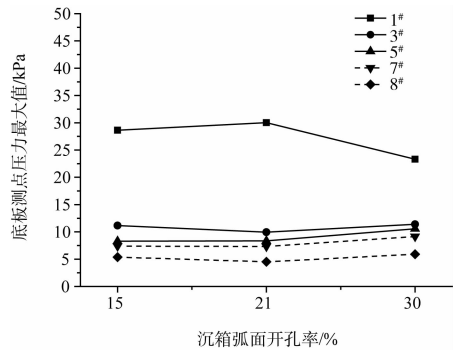
a) 圆弧面波吸力-沉箱弧面开孔率



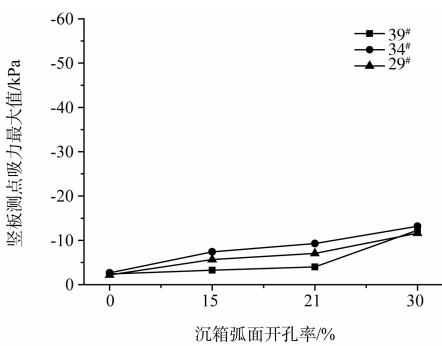
a) 圆弧面波压力-沉箱弧面开孔率



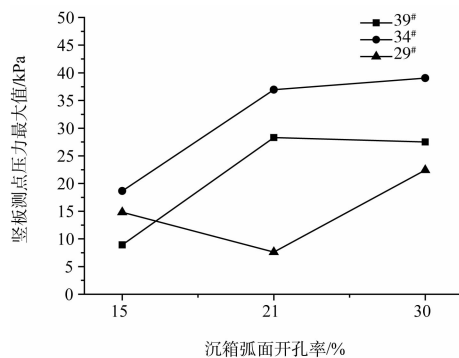
b) 底板波吸力-沉箱弧面开孔率



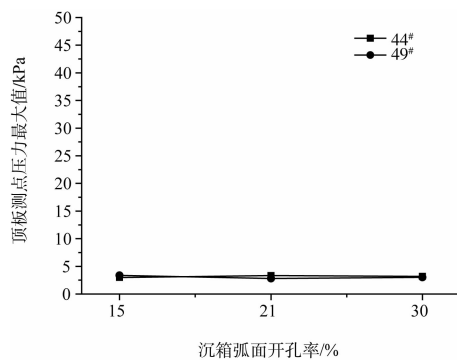
b) 底板波压力-沉箱弧面开孔率



c) 竖板波吸力-沉箱弧面开孔率



c) 竖板波压力-沉箱弧面开孔率



d) 顶板波压力-沉箱弧面开孔率

图9 沉箱弧面开孔率影响(设低水位波压力)

1) 分析数据图 7a) 与图 8a) 可知: 试验所选工况下, 沉箱弧面不开孔相对于开孔时弧面测点压力值较大 5% ~ 30%, 但开孔率在 15% ~ 30% 变化对其影响不大; 对于弧面测点波吸力, 只有较下方的 9# 测点波吸力值下降有 40% 之多, 其它测点所受影响不明显。

2) 分析数据图 7b) 与图 8b) 可知: 试验所选工况下, 随弧面开孔率增加, 沉箱底板前趾 1# 测点波压力和吸力均有超过 20% 的降幅, 沉箱内部底板的 3#、5# 和 7# 测点波压力有较大增幅, 底板测点波吸力较小且基本不受弧面开孔率影响。

3) 分析数据图 7c) 与图 8c) 可知: 试验所选工况下, 随弧面开孔率增加, 沉箱竖板所受波浪力有很大增幅, 测点波压力从不足 10 kPa 增至超过 30 kPa, 波吸力也从几乎为 0 增至超过 10 kPa。

4) 分析数据图 7d) 与图 8d) 可知: 试验所选工况下, 随弧面开孔率增加, 沉箱顶板测点波力较小且无明显变化。

5) 分析数据图 7 和图 9 可知: 试验所选工况下, 设低水位和设高水位相比: 圆弧面测点波压力总体较大, 下方 9#、11#、12# 测点较设高增大 50% ~ 70%, 上方 19#、27#、23#、24# 测点略有减小; 底板波压力较大, 1# 测点设低比设高时增大 40%, 其它测点增幅不大; 竖板波压力无明显变化; 顶板波压力较设高水位时略小。

3 结论

1) 顶板开孔率 0 ~ 2.31% 范围内, 沉箱顶盖

板浮托力变化较明显, 堤体其他结构对此并不敏感, 建议工程设计中沉箱顶开孔率采用 1% 左右即可大大减小顶板所受浮托力。

2) 随沉箱填充率 0 ~ 70% 增加, 圆弧板静水位以下波吸力、底板局部波压力有所变化, 竖板静水位以上波压力值大大减小, 竖板波吸力和顶板所受浮托力在填充率为 58% 时达到最低水平, 因此综合考虑, 沉箱填石率在满足结构稳定的前提下, 最好设计在 30% ~ 60% 范围内。

3) 圆弧板开孔与不开孔相比, 圆弧板本身所受波浪力总体明显较小, 但开孔率在 15% ~ 30% 变化过程中再无明显降低, 反而竖板所受波浪力会有大幅增加, 因此, 从结构受力角度考虑, 圆弧面狭缝开孔率 15% 左右即可, 不宜大于 15%。

4) 同样波浪要素在不同水位情况下作用, 结构各部位受力情况变化较大, 设计时应计算多种组合从而找出最不利情况。

参考文献:

- [1] 牛恩宗, 王玥葳, 马德堂. 防波堤结构的创新[J]. 水运工程, 2009(1): 16-22.
- [2] 徐光, 谢善文, 李元音. 防波堤的新结构形式[J]. 水运工程, 2001(11): 20-25.
- [3] 俞聿修, 张宁川, 饶永红. 半圆型防波堤的水力特性研究[J]. 海洋工程, 1999(4): 39-48.
- [4] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [5] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [6] SL 435—2008 海堤工程设计规范[S].
- [7] 施晓迪, 琚烈红, 冯卫兵, 等. 开孔沉箱消浪性能试验研究[J]. 水运工程, 2011(3): 16-20.
- [8] 陈雪峰, 李玉成, 孔丽. 不规则波与开孔沉箱作用数值模拟[C]//上海《水动力学研究与进展》杂志社, 四川大学水力学与山区河流开发保护实验室. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集, 2009.
- [9] 降英. 圆弧形护面斜坡式防波堤水动力及消浪特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [10] Aburatani S, Koizuka T. Field test on a semi-circular caisson breakwater[J]. Coastal Engineering in Japan, 1996, 39(1): 59-78.

(本文编辑 郭雪珍)