

· 综 合 ·

混凝土铰链排护坡式海堤波压力试验研究*



王飞朋¹, 邵宇阳², 吕博³, 朱正雷²

(1. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江 宁波 315040;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 滨海县水利局, 江苏 盐城 224500)

摘要: 结合苏北滨海海域实际海堤防护工程, 通过波浪断面物理模型试验, 对柔性混凝土铰链排和刚性混凝土槽型块两种护坡形式分别展开各海堤断面中消浪平台及以上堤身结构在规则波及不规则波作用下的波压力研究, 并比较分析两者之间的差异。试验结果表明, 铰链排护坡对消减波能的效果要优于槽型块护坡, 更有利于海堤的安全性和稳定性。同时根据波压力分析结果对混凝土铰链排护坡式海堤提出了相应的优化加固措施。

关键词: 混凝土铰链排; 海岸防护; 物理模型试验; 波压力; 优化加固

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0018-07

Experimental study of the wave pressure on seawall with hinged concrete slab mattress revetment

WANG Fei-peng¹, SHAO Yu-yang², LYU Bo³, ZHU Zheng-lei²

(1. Ningbo China Communication Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315040, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Binhai County Water Conservancy Bureau, Yancheng 224500, China)

Abstract: Combined with the instance of practical seawall protection project in Binhai sea area of North Jiangsu province, we explore the wave pressure on wave dissipation platform and seawall structure above the platform under the action of regular and irregular waves in the case of flexible hinged concrete slab mattress revetment and rigid concrete groove block revetment respectively through wave section physical model experiment, and compare the differences between them. The experimental results show that hinged concrete slab mattress revetment does better than concrete groove block revetment in reducing the wave energy and is more conducive to security and stability of seawall. Moreover, corresponding optimization and reinforcement methods for seawall with hinged concrete slab mattress revetment are put forward according to the analytical results of wave pressure.

Keywords: hinged concrete slab mattress; coastal protection; physical model experiment; wave pressure; optimization and reinforcement

传统刚性海岸防护结构往往无法适应岸滩的侵蚀变形, 在强风浪或风暴潮的侵袭下极易水毁坍塌, 形成缺口, 丧失对海岸的保护作用,

危及后方安全。近年来, 国内外在内陆江河及河口地区的护岸保滩工程中, 成功应用并推广的混凝土铰链排结构具有整体性好、抗冲及适

收稿日期: 2016-04-16

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51339005); 江苏省水利厅科技项目(2013-55)

作者简介: 王飞朋(1989—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

应岸坡冲刷变形能力强等特点^[1-2], 能够有效克服刚性护岸在岸坡冲刷变形情况下易损毁的缺陷, 并已取得了良好的经济和社会效益, 但该结构形式在海岸防护中的工程实践较少, 尚缺乏适用于沿海地区的成熟的混凝土铰链排防护技术。此外, 目前有关混凝土铰链排的研究主要考虑水流或规则波作用^[3], 而实际海浪多为不规则波, 波浪对工程结构的作用更加复杂, 将对结构的安全性和稳定性造成更为严重的影响, 根据波浪作用特点采用合理的结构形式是工程成功的关键。综上所述, 开展适用于沿海地区的混凝土铰链排防护技术及波浪对工程结构作用特点的研究具有非常重要的现实意义, 可为今后混凝土铰链排在海岸防护中的应用和推广提供一定的参考依据。

本文结合实际海堤防护工程, 通过波浪断面物理模型试验, 对柔性混凝土铰链排和刚性混凝土槽型块两种护坡形式分别展开各海堤断面中消浪平台及以上堤身结构在规则波及不规则波作用下的波压力研究, 比较分析两者之间的差异, 并根据分析结果对铰链排护坡式海堤结构的优化加固措施进行探讨, 以提高其可靠性。

1 试验概述

1.1 试验设备及仪器

试验在河海大学海工实验室的波浪水槽内进行, 水槽长 80.0 m、宽 1.0 m、高 1.2 m。水槽前端安装有液压式推板造波机, 可产生重复性较好的规则波和不同谱型的不规则波, 末端设有消能

装置, 用以吸收波能、减小波浪反射影响。

波压力测量采用中国水利水电科学研究院研制的 DJ800 型多功能监测系统, 该系统是由计算机、多功能监测仪和压力传感器所组成的数据采集和处理系统。

1.2 试验断面

试验选取滨海县翻身河以北段达标海堤防护工程断面为典型试验断面^[4], 即试验断面 1(图 1), 该断面采用混凝土槽型块护坡。本文在试验断面 1 的基础上构建了一种新型柔性混凝土铰链排护坡式海堤结构, 即试验断面 2(图 2)。在试验断面 2 中, 压载块体尺寸由排体稳定性试验确定, 长、宽分别为 0.8、0.6 m, 排首和排尾各 6 排压载块体厚度为 0.5 m, 中间其余压载块体厚度为 0.3 m, 块体间距为 0.1 m。消浪平台前沿的混凝土埂为系排梁, 顶高程为 3.0 m, 底高程为 1.0 m。系排梁具有承上启下的作用, 既可稳定消浪平台及以上堤身结构, 又能够固定排首, 是工程成功的关键。

选取上述试验断面的主要原因: 1) 滨海县位于苏北废黄河三角洲尖部, 其海岸是江苏省侵蚀最为严重的海岸, 同时也是全国典型侵蚀性海岸之一。在滨海县翻身河口附近海域, 波流作用强、岸滩侵蚀严重, 即便建造了管桩顺坝等保滩工程, 海堤仍严重水毁坍塌, 刚性防护结构已无法有效解决当前海岸侵蚀问题, 因此滨海县亟待寻求更为有效的海岸防护措施。2) 在今后海岸治理中, 滨海县可能会在翻身河口附近海岸建造混凝土铰链排防护工程, 以探究该新型柔性结构形式对海岸岸滩的治理效果。

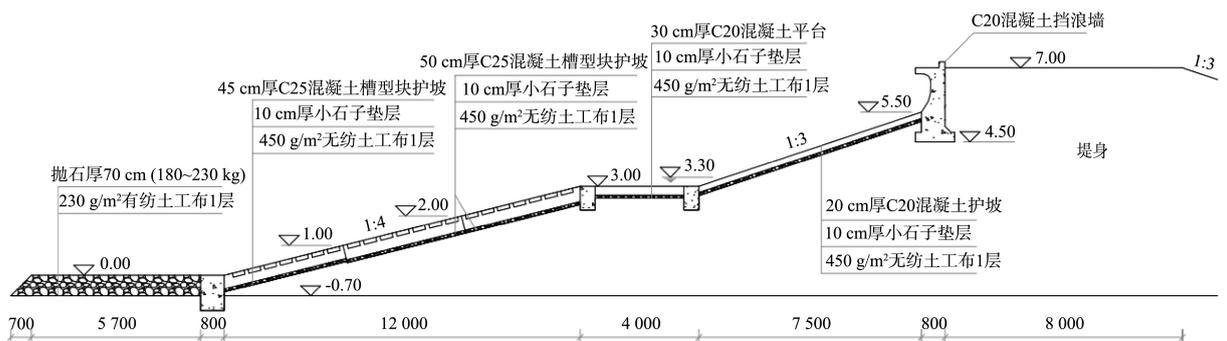


图 1 试验断面 1 (混凝土槽型块护坡) (高程: m; 尺寸: mm。下同)

根据上述分析, 确定试验研究内容如下: 在铰链排和槽型块两种护坡形式下, 测量试验断面在 50 a 一遇设计高潮位及相应波况作用时消浪平台、混凝土护坡(高程 3.0~5.5 m)及挡浪墙的波压力, 并对测量结果进行比较(其中规则波比较平均波压力 P_{aver} , 不规则波比较波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$), 分析得出两种护坡形式对消浪平台及以上堤身结构波压力的影响差异。

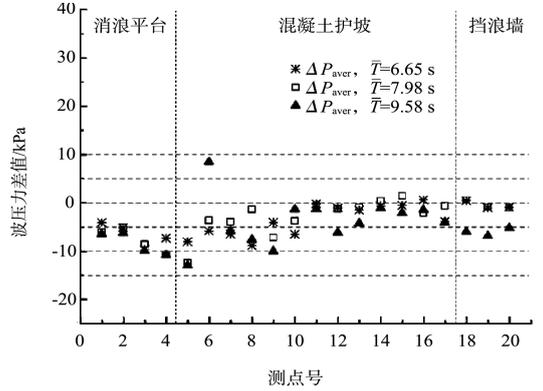
2 消浪平台及以上堤身结构波压力分析

以下根据不同试验波况时各测点所测得的波压力及波压力差值 ΔP (波压力差值 ΔP 为同一试验波况时各测点在铰链排护坡下的波压力减去在槽型块护坡下的波压力所得的差值), 比较分析两种护坡形式对消浪平台及以上堤身结构波压力的影响差异。

2.1 规则波作用时波压力分析

当规则波($H_{1\%} = 2.4$ m)作用时, 两种护坡形式下所测得的平均波压力 P_{aver} 较大值均分布在消浪平台和混凝土护坡下部, 最大值均出现在 5#测点, 且铰链排护坡下的平均波压力最大值均比槽型块护坡下所测得的结果小(图 4)。

当平均波周期为 6.65 s 和 7.98 s 时, 消浪平台和混凝土护坡下部的 $\Delta P_{aver} < 0$ 且 $|\Delta P_{aver}|$ 较大, 混凝土护坡上部和挡浪墙的 $\Delta P_{aver} \approx 0$, 说明该波况下铰链排护坡对减小消浪平台和混凝土护坡下部平均波压力的效果优于槽型块护坡, 而混凝土护坡上部和挡浪墙在两种护坡形式下的平均波压力差异不大。



b) 波压力差值 ΔP_{aver}

注: 潮位 3.30 m, $H_{1\%} = 2.40$ m。

图 4 平均波压力 P_{aver} 及波压力差值 ΔP_{aver}

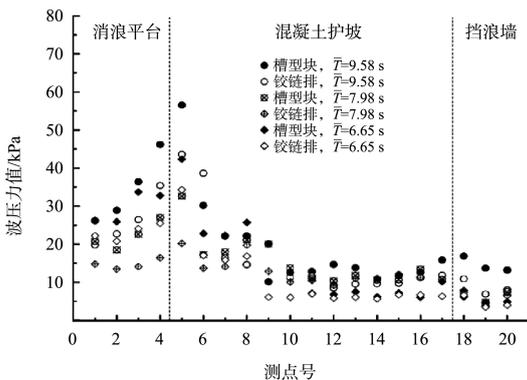
当平均波周期为 9.58 s 时, 仅 6#测点的 $\Delta P_{aver} = 8.48$ kPa > 0 , 其余测点的 $\Delta P_{aver} < 0$, 其中 4#、5#、9#测点的 $|\Delta P_{aver}| > 10$ kPa, 1#~3#、7#、8#、18#~20#测点的 $|\Delta P_{aver}| > 5$ kPa, 说明与槽型块护坡相比, 该波况下铰链排护坡更有利于减小消浪平台及以上堤身结构的平均波压力。

2.2 不规则波作用时波压力分析

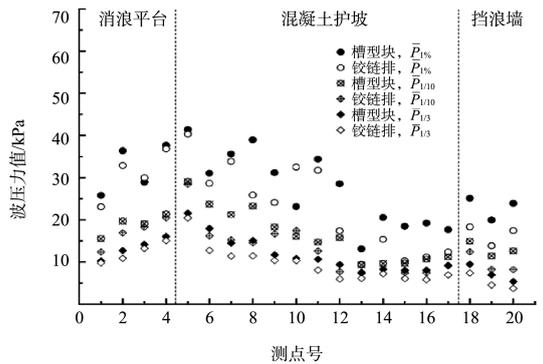
1) 谱峰周期 T_p 为 8.05 s。

当不规则波($H_s = 1.80$ m, $T_p = 8.05$ s)作用时, 两种护坡形式下所测得的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 较大值均分布在消浪平台和混凝土护坡下部, 最大值均出现在 5#测点, 且铰链排护坡下的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 最大值均比槽型块护坡下所测得的结果小(图 5)。

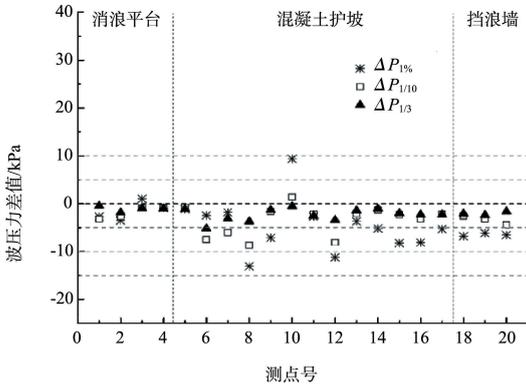
仅 3#、10#测点的 $\Delta P_{1\%} > 0$, 分别为 1.02、9.38 kPa, 其余测点的 $\Delta P_{1\%} < 0$, 且 8#、12#测点的 $|\Delta P_{1\%}| > 10$ kPa, 9#、14#~20#测点的 $|\Delta P_{1\%}| > 5$ kPa。



a) 平均波压力 P_{aver}

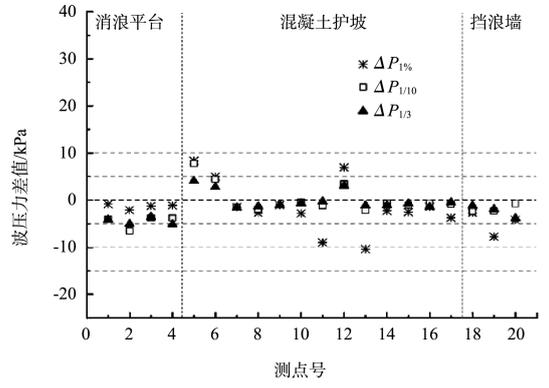


a) 波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 、 $P_{1/3}$



b) 波压力差值 ΔP

注：潮位 3.30 m, $H_s = 1.80$ m, $T_p = 8.05$ s。



b) 波压力差值 ΔP

注：潮位 3.30 m, $H_s = 1.80$ m, $T_p = 9.66$ s。

图5 波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 、 $P_{1/3}$ 及波压力差值 ΔP ($T_p = 8.05$ s)

除 10#测点的 $\Delta P_{1/10} = 1.40$ kPa > 0 外, 其余测点的 $\Delta P_{1/10} < 0$, 且 6# ~ 8#、12#测点的 $|\Delta P_{1/10}| > 5$ kPa。各测点的 $\Delta P_{1/3} < 0$ 。说明与槽型块护坡相比, 该波况下铰链排护坡更有利于减小消浪平台及以上堤身结构的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 。

2) 谱峰周期 T_p 为 9.66 s。

当不规则波 ($H_s = 1.80$ m, $T_p = 9.66$ s) 作用时, 两种护坡形式下所测得的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 较大值均分布在消浪平台和混凝土护坡下部, 最大值均出现在 5#测点, 且铰链排护坡下的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 最大值均比槽型块护坡下所测得的结果大(图6)。

5#、6#、12#测点的 $\Delta P_{1\%}$ 、 $\Delta P_{1/10}$ 和 $\Delta P_{1/3} > 0$, 其余测点的 $\Delta P_{1\%}$ 、 $\Delta P_{1/10}$ 和 $\Delta P_{1/3} < 0$, 说明从整体而言, 该波况下铰链排护坡对减小消浪平台及以上堤身结构波压力 $\Delta P_{1\%}$ 、 $\Delta P_{1/10}$ 和 $\Delta P_{1/3}$ 的效果优于槽型块护坡。但 5#、6#、12#测点的 $\Delta P_{1\%}$ 、 $\Delta P_{1/10}$ 和 $\Delta P_{1/3}$ 较大, 3个测点的 $\Delta P_{1\%} > 5$ kPa,

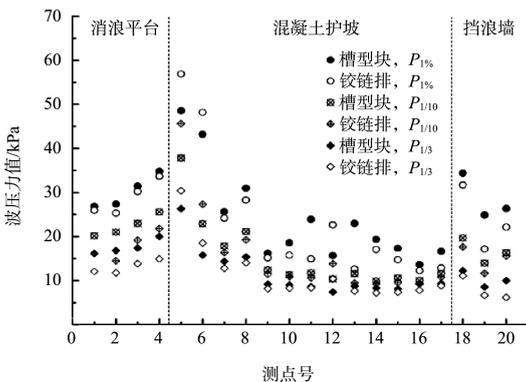
图6 波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 、 $P_{1/3}$ 及波压力差值 ΔP ($T_p = 9.66$ s)

5#测点的 $\Delta P_{1/10} > 5$ kPa, 6#测点的 $\Delta P_{1/10} \approx 5$ kPa, 5#测点的 $\Delta P_{1/3} \approx 5$ kPa, 可见该波况下铰链排护坡将使 5#、6#、12#测点的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 有较为明显的增大。

3) 谱峰周期 T_p 为 11.59 s。

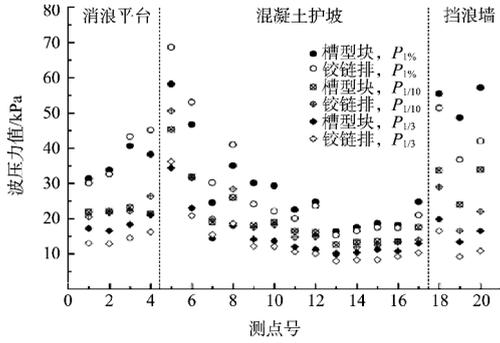
当不规则波 ($H_s = 1.80$ m, $T_p = 11.59$ s) 作用时, 两种护坡形式下所测得的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 较大值均分布在消浪平台和混凝土护坡下部, 最大值均出现在 5#测点, 且铰链排护坡下的波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 和 $P_{1/3}$ 最大值均比槽型块护坡下所测得的结果大(图7)。

3# ~ 8#测点的 $\Delta P_{1\%} > 0$, 且 4# ~ 8#测点的 $\Delta P_{1\%} > 5$ kPa, 5#测点的 $\Delta P_{1\%} > 10$ kPa, 其余测点的 $\Delta P_{1\%} < 0$, 其中 9#、10#测点的 $|\Delta P_{1\%}| > 5$ kPa, 17#、18#测点的 $|\Delta P_{1\%}| \approx 5$ kPa, 19#、20#测点的 $|\Delta P_{1\%}| > 10$ kPa, 说明与槽型块护坡相比, 该波况下铰链排护坡更有利于减小混凝土护坡中上部和挡浪墙的波压力 $P_{1\%}$, 但将使消浪平台后半段和混凝土护坡下部的波压力 $P_{1\%}$ 显著增大, 对海堤的安全性和稳定性较为不利。4#、5#、7#、8#测点的 $\Delta P_{1/10} > 0$, 其中 4#、5#测点的 $\Delta P_{1/10} \approx 5$ kPa, 7#、8#测点的 $\Delta P_{1/10}$ 较小, 其余测点的 $\Delta P_{1/10} < 0$, 且 17# ~ 20#测点的 $|\Delta P_{1/10}|$ 较大, 说明从整体而言, 该波况下铰链排护坡对减小消浪平台及以上堤身结构波压力 $P_{1/10}$ 的效果优于槽型块护坡, 尤其对减小挡浪墙的波压力 $P_{1/10}$ 效果显著, 但将使消浪平台和混凝土护坡之间衔接区域的波压力 $P_{1/10}$ 显著增大。除 5#、

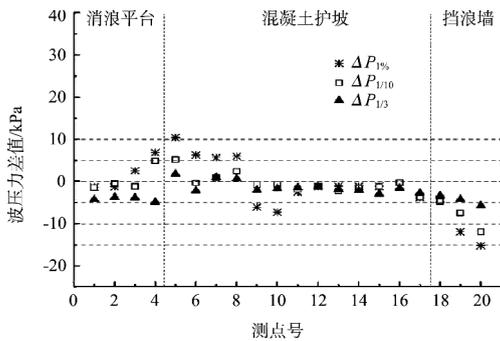


a) 波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 、 $P_{1/3}$

7#、8#测点的 $\Delta P_{1/3} \approx 0$ 外, 其余测点的 $\Delta P_{1/3} < 0$, 且消浪平台、挡浪墙位置的 $|\Delta P_{1/3}|$ 较大, 说明与槽型块护坡相比, 该波况下铰链排护坡更有利于减小消浪平台及以上堤身结构的波压力 $P_{1/3}$, 尤其对减小消浪平台和挡浪墙的波压力 $P_{1/3}$ 效果显著。



a) 波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 、 $P_{1/3}$



b) 波压力差值 ΔP

注: 潮位 3.30 m, $H_s = 1.80$ m, $T_p = 11.59$ s。

图 7 波压力 $P_{1\%}$ 、 $P_{1/10}$ 、 $P_{1/3}$ 及波压力差值 ΔP ($T_p = 11.59$ s)

3 海堤优化加固措施

根据波压力分析结果, 可得出以下结论: 1) 波压力分布规律: 消浪平台及以上堤身结构波压力在铰链排和槽型块两种护坡形式下的分布规律基本一致, 较大值均主要分布在消浪平台和混凝土护坡下部, 最大值均出现在 5#测点(混凝土护坡下部, 靠近消浪平台)。2) 波压力差值 $\Delta P > 5$ kPa 的分布区域: 当某测点的 $\Delta P > 0$ 且值较大时, 说明与槽型块护坡相比, 铰链排护坡对该测点位置的受力情况较为不利。由 $\Delta P > 5$ kPa 时所对应的波况、波压力差值类型、测点编号及测点位置(表 2)可知, 试验出现 $\Delta P > 5$ kPa 的测点主要分布在消浪平台后半段、混凝土护坡下部(靠近消浪平台)和中部局部区域。综合以上两点因素, 本文给出以下两种针对铰链排护坡式海堤的优化加固措施。

3.1 增加局部结构强度

波浪作用较强的区域常常因强度不够而发生结构破坏, 底部垫层被淘刷, 最终导致海堤整体损毁^[8]。建议适当增加消浪平台后半段、高程 3.0~4.5 m 混凝土护坡的厚度及消浪平台和混凝土护坡之间混凝土埂的埋深(图 8), 以提高消浪平台及以上堤身结构在波浪作用下的安全性和稳定性。

表 2 波压力差值 $\Delta P > 5$ kPa 的情况

波况	波压力差值类型	测点编号	测点位置
规则波 ($\bar{T} = 9.58$ s)	ΔP_{aver}	6#	混凝土护坡下部(靠近消浪平台)
不规则波 ($T_p = 8.05$ s)	$\Delta P_{1\%}$	10#	混凝土护坡中部
不规则波 ($T_p = 9.66$ s)	$\Delta P_{1\%}$	5#、6#、12#	混凝土护坡下部(靠近消浪平台)、中部
	$\Delta P_{1/10}$	5#	混凝土护坡下部(靠近消浪平台)
不规则波 ($T_p = 11.59$ s)	$\Delta P_{1\%}$	4#~8#	消浪平台后半段、混凝土护坡下部
	$\Delta P_{1/10}$	5#	混凝土护坡下部(靠近消浪平台)

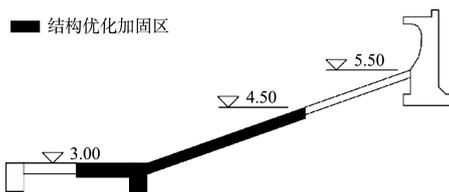


图 8 结构优化加固区(单位: m)

3.2 提高排体粗糙程度

可通过改进压载块体的结构形式, 以提高铰链排护坡的粗糙程度, 从而进一步增强护坡对波能的消减能力, 减轻波浪对排体以上堤身结构的作用。本文给出两种改进压载块体结构形式的方法, 可在一定程度上提高铰链排护坡的粗糙程度。第 1 种方法是在压载块体上表面的两侧(平行于海岸)构建对称梯形结构(图 9a), 第 2 种方法是在压载块体的中心区域设置圆形透空结构(图 9b)。以上两种结构形式压载块体对消减波能的作用可

链排护坡的粗糙程度, 从而进一步增强护坡对波能的消减能力, 减轻波浪对排体以上堤身结构的作用。本文给出两种改进压载块体结构形式的方法, 可在一定程度上提高铰链排护坡的粗糙程度。第 1 种方法是在压载块体上表面的两侧(平行于海岸)构建对称梯形结构(图 9a), 第 2 种方法是在压载块体的中心区域设置圆形透空结构(图 9b)。以上两种结构形式压载块体对消减波能的作用可

通过物理模型试验进行验证。

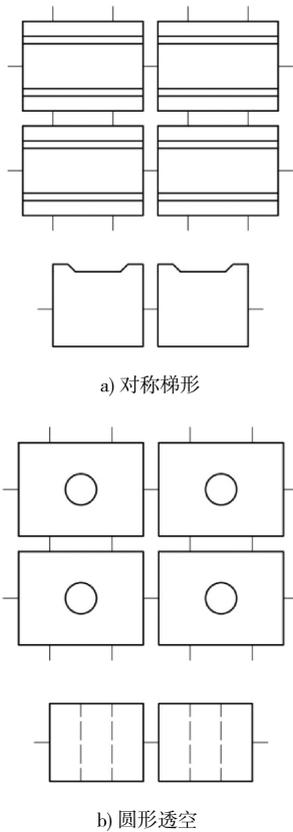


图9 压载块体连接

4 结论

1) 在设计高潮位、各试验波况作用时, 铰链排和槽型块两种护坡形式下消浪平台及以上堤身结构波压力的较大值均分布在消浪平台和混凝土护坡下部, 最大值均出现在混凝土护坡下部(靠近消浪平台)。

2) 不同试验波况作用时, 铰链排和槽型块两种护坡形式对消浪平台及以上堤身结构波压力的影响有所差异。但从整体而言, 铰链排护坡对减小消浪平台及以上堤身结构波压力的效果要优于槽型块护坡。

3) 可通过增加局部结构强度和提髙排体粗糙程度等优化加固措施, 达到增强混凝土铰链排护坡式海堤安全性和稳定性的目的, 保证海堤能够长期有效发挥对岸滩的保护作用。

参考文献:

[1] 李涛章, 叶松, 廖小元, 等. 铰链混凝土板沉排新技术与施工实践[J]. 人民长江, 2002, 33(8): 26-28.

[2] 沃玉报. 铰链混凝土排在长江河道整治工程中的应用[J]. 山西建筑, 2007, 33(4): 354-355.

[3] 何阳, 据烈红, 李鹏. 波流共同作用下混凝土块软体排稳定性研究[J]. 水运工程, 2014(7): 28-31.

[4] 盐城市水利勘测设计研究院. 滨海县2008年度海堤达标工程初步设计报告[R]. 盐城: 盐城市水利勘测设计研究院, 2007.

[5] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].

[6] JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S].

[7] 黄锦林, 程永东. 海堤和护岸消浪形式选择[J]. 广东水利水电, 2009(4): 37-40.

[8] 冯卫兵, 崔磊, 仲南艳, 等. 斜坡堤护面板上最大波压力研究[J]. 水运工程, 2013(1): 12-15.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第17页)

参考文献:

[1] JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].

[2] 刘宏, 仲丛宏, 李太春, 等. 多波束在软体排铺设检测中的应用[C]//江苏省航海学会. 第六届长三角科技论坛(测绘分论坛)论文集, 2009.

[3] 邱永敢, 袁士彬, 徐健. 侧扫声纳在检测水下软体排铺设质量中的应用[C]//山东测绘学会. 山东测绘学会2013第十五届华东六省一市测绘学会学术交流会(山东分册)论文集, 2013.

[4] 焦永强, 田维新, 潘贤亮. 超短基线测量技术在铺排施

工中的应用[J]. 中国港湾建设, 2013(3): 60-61.

[5] 李海滨, 滕惠忠, 宋海英, 等. 基于侧扫声呐图像海底目标物提取方法[J]. 海洋测绘, 2010(6): 71-73.

[6] 冯超, 张广学. 多波束系统与侧扫声呐系统的融合可行性分析[J]. 企业导报, 2011(22): 198.

[7] 肖庆华, 潘美元, 雷国平, 等. D型软体排沉排施工中缩撕断排机理[J]. 水运工程, 2015(1): 200.

[8] 郑健, 强龙, 杨春玲. 深水软体排搭接检测方法的试验性研究[J]. 港工技术, 2014, 51(2): 65-68.

(本文编辑 郭雪珍)