



强浪海域埋入式护底对防波堤 稳定性的影响分析

杜冰茹, 余之林, 刘姝娜

(交通运输部广州打捞局, 广东 广州 510610)

摘要: 海南岛东南海岸台风频繁, 近岸波浪极限波高可达 10 m, 建港条件恶劣。防波堤的结构安全成为在该海域建港的关键难题。基于南海应急抢险打捞保障基地工程对斜坡式防波堤稳定性进行研究, 通过建立三维波浪整体物理模型对防波堤不同形式的护面及护底块体进行稳定性试验。结果表明: 在该强浪海域, 防波堤护底的稳定直接影响护面的稳定。通过加大护底块石质量以达到稳定的效果不佳, 而通过采用埋入式护底的结构形式可有效提高稳定的同时有利于减小护底块石的质量, 进而达到防波堤护面结构稳定的要求, 一定程度上节省了工程投资。

关键词: 海南岛东南海岸; 三维波浪整体物理模型; 卷破波; 埋入式护底

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0038-08

Influence of embedded bottom blocks on stability of breakwaters in strong wave areas

DU Bingru, YU Zhilin, LIU Shuna

(Guangzhou Salvage Bureau of the Ministry of Transport, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The southeastern coast of Hainan Island experiences frequent typhoons, and the nearshore wave limiting heights can reach up to 10 meters, making the port construction conditions harsh. The structural safety of the breakwater becomes a key challenge for port construction in this sea area. This paper studies the stability of the sloping breakwater based on the South China Sea emergency salvage support base project, and conducts stability experiments on different types of armor blocks and bottom blocks of the breakwater using a three-dimensional wave physical model. The results indicate that the stability of the breakwater foundation directly affects the stability of the armor blocks in this strong wave areas. Increasing the mass of the bottom blocks to achieve stability is not effective, while adopting an embedded bottom protection can improve stability and minimize the mass of the bottom blocks, thereby meeting the stability requirements of the breakwater armor blocks and saving engineering investment to some extent.

Keywords: southeastern coast of Hainan Island; three-dimensional wave physical model; plunging breaker; embedded bottom block

海南东南海岸海域是台风登录最多的中国海域, 年均均有 4 场台风对本区域产生影响。海域海况恶劣, 深水海域 50 a 一遇有效波高超过 12 m, 周期 12 s。台风引起的大浪传播至工程区域附近时, 发生破碎达到极限波高 10 m。本文基于南海

应急抢险打捞保障基地工程, 通过建立三维波浪整体物理模型对防波堤稳定性进行试验, 揭示该海域防波堤的破坏机制及护底稳定性对整个防波堤结构稳定影响的重要性, 提出埋入式护底结构可有效提高防波堤护面结构稳定性; 同时有利于

收稿日期: 2023-06-25

作者简介: 杜冰茹 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程研究。

减小护底块石质量, 降低工程投资。

三维波浪整体物理模型试验已成为研究波浪与防波堤相互作用的重要手段, 可全面客观地反演斜向浪产生的沿堤流、越浪、波浪浅水变形、折绕射及与防波堤的相互作用, 在工程上应用日趋广泛^[1-2]。张华昌等^[3]、戈龙仔等^[4]通过试验发现斜向浪在沿堤传播过程中形成的壅水及冲击波流, 对接岸斜坡堤稳定造成较大威胁; 常梅等^[5]、赵云鹏等^[6]通过试验发现现有行业规范对护面结构质量相关规定存在局限性, 斜向浪较正向浪对防波堤的稳定性更为不利。护底稳定性对防波堤整体稳定性的影响方面的研究较少, 詹田进等^[7]就不同设计规范及相关抛石稳定质量经验公式, 对比相同流速下不同公式得到的块石稳定质量存在较大差异, 指出流速大于 5.0 m/s 时, 块石稳定质量会大幅增大, 需要采用人工块体替代天然块石; 刘慧芳等^[8]提出在水深较浅时发生卷破波, 导致护岸护底块石淘刷, 进而导致护面失稳, 单独增加护底块石质量对稳定性改善不明显, 建议增加河床糙率或增加护底块石的埋深。在总结前人研究的基础上, 本文全面剖析强浪海域防波堤的破坏机理并强调护底稳定性对整个防波堤结构安全的重要性, 提出适用于强浪海域的防波堤设计方案, 供其他类似项目参考。

1 工程概况

拟建南海应急抢险打捞保障基地位于海南岛东侧沿海海域, 地理坐标 14°33'N、120°58'E, 位置见图 1。建设规模为 1 个 8 万 DWT 重件泊位。防波堤东南—南向布置, 东防波堤长 458 m, 南防波堤长 242 m, 防波堤内、外侧均为斜坡式结构, 内、外坡均采用 1:1.5 坡度, 采用抛石斜坡堤结构。防波堤按允许越浪设计, 堤顶高程 6.5 m; 码头与防波堤采用分离式布置, 码头采用高桩结构, 长 272.1 m、宽 30 m, 码头顶高程 4.8 m。港池航道水域开挖至 -11.9 m。平面布置及波浪采样点 ($T_1 \sim T_5$) 分布见图 2。



图 1 拟建工程位置

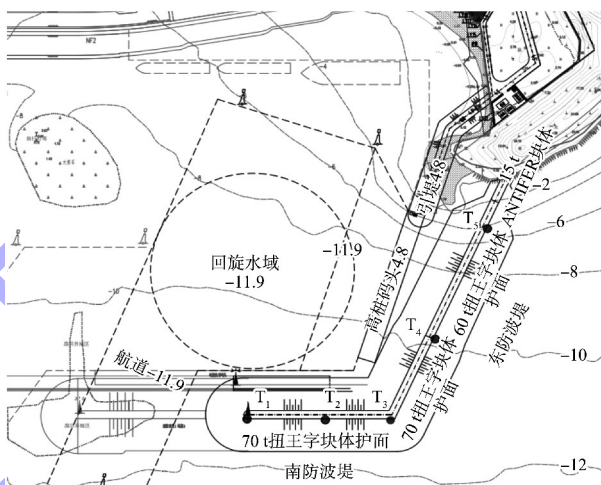


图 2 平面布置及波浪采样点分布 (单位: m)

2 设计条件

2.1 设计水位

设计高水位为 1.27 m, 设计低水位为 -0.17 m, 极端高水位为 2.50 m (50 a 一遇高潮位), 极端低水位为 -0.81 m (50 a 一遇低潮位)。

2.2 防波堤设计波要素

防波堤极端高水位和设计高水位 50 a 一遇重现期最大设计波要素结果见表 1。可以看出, 工程海域 50 a 一遇的波浪已达到极限波高 9.92 m, 防波堤处于破波带范围。

表 1 极端高水位 50 a 一遇设计波要素

波浪 采样点	$H_{1\%}/$ m	$H_{4\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	周期 T/s	波长 L_m/m	波向/ (°)
T_1	9.92*	9.92*	8.79	12	132	142
T_2	9.76*	9.74	8.58	12	131	143
T_3	9.39*	9.39*	8.50	12	129	144
T_4	8.42*	8.42*	8.42*	12	123	146
T_5	4.69*	4.69*	4.69*	12	94	153

注: * 表示波浪已破碎。

3 防波堤结构原设计方案

通过试验结果发现,防波堤失稳段主要集中在南堤堤头、转角和东堤堤身(不含堤根段约 50 m),本文仅对南堤外侧、转角及东堤堤身断面结构进行分析。根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[9]计算的护面块体稳定质量见表 2。南防波堤—东防波堤 150 m 处(转角起算),稳定质量 45 t 可基本满足要求,通过取南堤和东堤典型断面进行二维波浪断面物理模型试验,结果为防波堤处于临界稳定状态;通过三维波浪局部物理模型预试验,结果为转角处护面发生大面积失稳。可以看出,根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》计算的稳定质量 45 t 扭王块未能满足稳定要求,须将南堤—东防波堤 150 m 的护面调整为 60 t 扭王块。

表 2 护面块体稳定质量计算结果

护面位置	波高 H/m	稳定 质量/t	原方案
南防波堤外侧	8.79	45.1	60 t 扭王块护面
转角-30~30 m 段	8.50	40.8	60 t 扭王块护面
东防波堤 30~<150 m 段	8.50	40.8	60 t 扭王块护面
东防波堤 150~413 m 段	8.45	40.1	45 t 扭王块护面

原设计方案为:1) 南防波堤。总长 242 m,回填 10~100 kg 块石形成堤心,外侧护面采用 60 t 扭王字块体,其下设置 3~4 t 大块石垫层和 150~300 kg 护面垫层块石,坡度均为 1:1.5。坡脚设 1.0~1.5 t 大块石护底,护底设于河床面以上,护底宽 15 m,按 1:2 放坡至河床面,其下设置 150~300 kg 垫层块石。内外侧护面及垫层相同。2) 东防波堤。总长 458 m,以转角位置作为起算点。0~<150 m 段,断面结构与南堤一致。150~413 m 段,回填 10~100 kg 块石形成堤心,外侧护面采用 45 t 扭王字块体,其下设置 2~3 t 大块石垫层和 100~200 kg 护面垫层块石,坡度均为 1:1.5。坡脚设 1.0~1.5 t 大块石护底,护底设于河床面以上,护底宽 15 m,按 1:2 放坡至河床面,其下设置 100~200 kg 垫层块石。内、外侧护面及垫层相同。

4 三维波浪整体物理模型

4.1 模型设置

模型范围 2 016 m×1 920 m(原型长×宽),根据试验内容与要求,结合前期数值模型结果的分析 and 试验场地、设备等情况综合考虑,选定本文试验模拟的几何比尺 λ 为 48,即波高比尺 λ_H 为 48,周期比尺 λ_T 为 6.92。采用正态模型,试验选用的其他比尺为:力比尺 λ_F 为 110 592,单宽流量比尺 λ_q 为 322.6,压强比尺 λ_p 为 48。试验用块体模型质量见表 3。港池边壁设置消波框,造波机与防波堤轴线距离为 635 m(大于 6 倍平均波长)。考虑 3 个主波向 S、SSE 和 SE 进行试验。模型摆放见图 3。

表 3 试验用块体模型质量

实物	模型质量/g
2~3 t 大块石	18~27
3~4 t 大块石	27~36
800~1 000 kg 护底块石	7~9
150~300 kg 垫层块石	1.35~2.70
100~200 kg 垫层块石	0.9~1.8
10~100 kg 堤心石	0.09~0.90
45 t 块体	397
60 t 块体	529

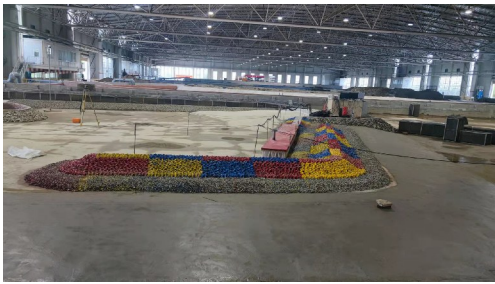


图 3 试验防波堤模型摆放

4.2 模型试验条件

不规则波采用频谱模拟,波谱选择 JONSWAP 谱,谱峰因子取 3.3。考虑 4 个水位(极端高水位、设计高水位、设计低水位和极端低水位)工况。每个水位正式试验前先打若干组小波,按极端低水位→设计低水位→设计高水位→极端高水位→设计高水位→设计低水位的过程进行试验,每个水位波浪作用 3 h,分为 7 组,每组 140 个波。方案优化阶段,为提高优化效率,选取最不利波向 SE

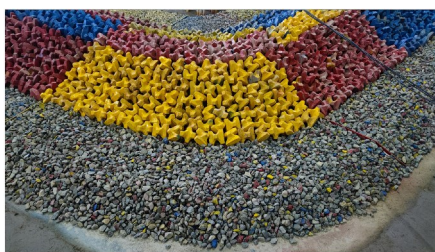
和极端高水位进行试验, 待方案稳定后, 进行全组合工况进行试验。

4.3 试验结果

4.3.1 原设计方案试验结果

南堤: 波浪波峰线与南堤轴线夹角约 45° , 未出现显著的波能集中现象, 南堤护底块石部分失稳卷上护面, 护面基本稳定。

转角段: 波能幅聚并破碎释放巨大波能, 大量护底块石受卷破波冲击向堤身翻滚, 在扭王字块与护底连接处扭王字块开始滚落失稳, 波浪作用 3 h 后, 转角段扭王字块整体失稳, 部分失稳块体在沿堤流作用下移动至南堤头附近。转角段试验前后对比见图 4。



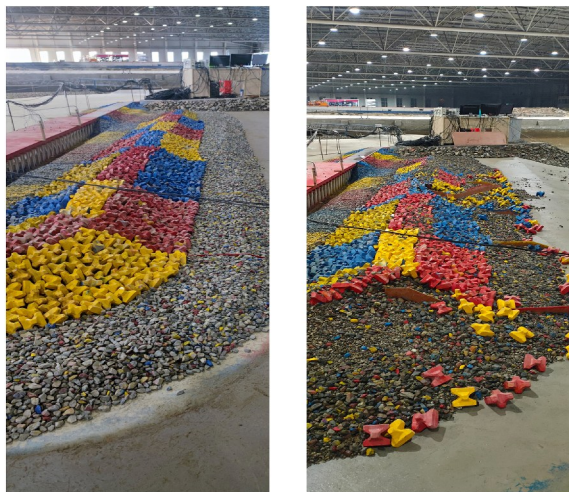
a) 试验前



b) 试验后

图 4 防波堤转角区域块体失稳情况

东堤 30~413 m 段: 波浪波峰线与东堤轴线夹角大约在 20° , 在东堤 100~150 m 段护底块石先随卷破波浪向堤身方向运动, 扭王字块与护底连接处块体开始滚落失稳。波浪作用 3 h 后, 东堤 60 t 块体段扭王块体整体失稳, 护底块石护底块石散落在护面处, 少量散布于防波堤堤顶; 东堤 45 t 块体段大量护底块石翻至堤顶区域, 部分块体翻越至防波堤内侧, 扭王字块整体失稳。试验前后对比见图 5。



a) 试验前

b) 试验后

图 5 东防波堤堤身区域块体失稳情况

由转角段和东堤 30~413 m 段防波堤失稳过程可见, 护底的稳定直接影响了护面的稳定。

护底块石失稳主要有 2 个原因, 即波能集中导致卷破波对护底冲击力增大和强沿堤流的淘刷。从整理物理模型和断面物理模型试验过程可见, 波浪传播至护底区域, 由于水深迅速变浅, 波浪波长变短、波陡增大, 波浪发生了卷破。卷破波作用于结构时, 会在结构上形成很强的冲击作用, Cuomo 等^[10]指出其荷载峰值可能达到波高相同的非破碎波浪的 10 倍左右。在断面物理模型试验过程可看出当护底处于波谷作用时, 水深较浅, 波浪发生卷破引起护底块石的强烈扰动(图 6), 卷破波对护底块体产生沿海侧方向的拖拽作用, 从而导致护底块石被卷起并随卷破波冲击流不断上移至护面, 部分块石随着越浪水体越过堤顶。极端高水位 50 a 一遇 SE 向浪作用下, 整个东堤及转角护底均受到卷破波作用(图 7), 南堤由于水深较深(约 12 m), 波浪发生卷破现象相对不明显。同时, 由于 SE 向浪波峰线与东堤夹角约 20° , 与南堤夹角约 45° , 东堤波浪沿波峰线发生卷破时直接作用于护底区域, 对护底块石冲击力较大。南堤仅在靠近波峰线与南堤相交区域卷破波对护底有冲击作用。因此, SE 向浪作用下, 东堤护底块石失稳较南堤更严重。



图6 断面物理模型卷破波作用于护底情况

图7 整体物理模型极端高水位 50 a 一遇
SE 向浪卷破波作用于护底情况

断面物理模型试验中,东堤典型断面护面采用 45 t 扭王字块,护底采用 800~1 000 kg 的块石,试验结果为临界稳定状态。整体物理模型试验中,转角和东堤护面采用 60 t 扭王字块,护底采用 1.0~1.5 t 块石均发生严重失稳。试验结果不一致。具体原因如下。

1) 断面物理模型无法反演转角和东堤局部波能集中现象。转角区域由于波浪折射,波能幅聚,波高变大,对护底和护面冲击力变大。断面物理模型试验转角有效波高小于整体物理模型幅聚后产生的有效波高。东堤在 100~<150 m 段发生波能集中,见图 8。100~<150 m 段有效波高增大到 9.39 和 8.94 m,较断面物理模型试验波高 7.58 m 明显增大。从试验过程可见,入射波浪在转角处形成分别沿东堤和南堤的分流水体,分流水体沿东堤传播引起水面波动,在东堤 100~<150 m 范围水位壅高,引起波高变大,见图 9。因此,转角和东堤 100~<150 m 段波能增加,对护底冲击力变大。由于断面物理模型仅能模拟正向浪入射,这种波能集中现象在断面物理模型中无法体现,导致断面物模试验结果偏不安全。

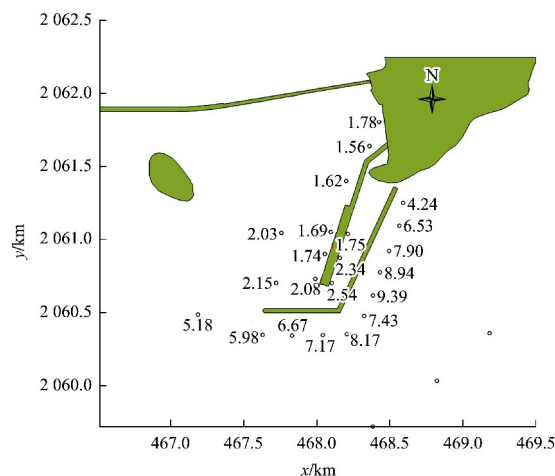
图8 整体物理模型极端高水位 50 a 一遇
SE 向各测点有效波高分布 (单位: m)

图9 分流水体引起的水位壅高

2) 断面物理模型无法反演斜向入射波浪破碎引起的沿堤流。波浪破碎后产生波生流沿堤方向传播。根据转角和堤头位置观测到最大底流速分别为 9.10 和 6.52 m/s,通过计算的堤头和转角的波浪底流速分别为 3.25 和 2.20 m/s,物理模型实测流速远大于规范计算的底流速。文献[7]得出当流速大于 5.0 m/s 时, JTJ 298—1998《防波堤设计与施工规范》已不适用,护底块石质量随流速增大而大幅增加。SE 向浪入射时,东堤波浪破碎产生转角至堤根方向的沿堤流,南堤产生转角至堤头方向的沿堤流,叠加波速及 Stokes 漂流沿堤分量,产生较大的底流速。从东堤和南堤扭王字块失稳后发生较大位移可进一步证明沿堤流对防波堤的作用。沿堤流的作用使护底块石和垫层被淘刷,加剧护底块石失稳。断面物理模型无法反演斜向浪产生的沿堤流,无法模拟沿堤流和卷破波的综合作用。因此,采用断面物理模型得到的试验结

果偏不安全。

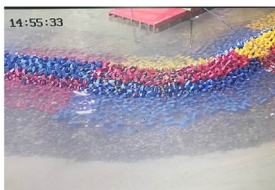
4.3.2 方案调整过程

原设计方案防波堤失稳主要是由于护底块石先大量失稳进而导致护面失稳。因此,方案优化

思路是先调整块石质量以保证护底块石稳定,同时考虑到转角波能相对集中,将转角段护面扭王字块调整为70 t。各调整方案试验结果见表4。各调整方案稳定性状态见图10。

表4 各方案防波堤稳定性试验结果

方案	位置	护面扭王块质量/t	护底块石质量(形式)/t	试验结果
调整方案1	南堤	60	3	护底部分块石卷上护面,护面块石基本稳定
	转角	70	3	护底块石大量卷上护面,护面扭王块大面积失稳
	东堤30~<150 m段	60	3	东堤30~<100 m段少量护底块石卷上护面,护面块石基本稳定;东堤100~<150 m波能集中,部分护底块石卷上护面,护面扭王块大面积失稳
	东堤150~413 m段	45	3	大量护底块石卷上堤顶,护面扭王块少量失稳
调整方案2	南堤	60	3	护底部分块石卷上护面,护面块石基本稳定
	转角	70	9	转角护底部分护底块石卷上护面,护面扭王块少量失稳
	东堤30~<150 m段	60	9	东堤100~<150 m段,护底块石少量卷上护面,护面扭王块个别失稳
	东堤150~413 m段	45	9	少量护底块石卷上护面,护面扭王块基本稳定
调整方案3	南堤	60	3	护底部分块石卷上护面,护面块石基本稳定
	转角	70	混凝土浇筑	护底与扭王块交界面咬合力不足发生扭王块失稳
	东堤30~<100 m段	60	30	护底和护面扭王块均稳定
	东堤100~<150 m段	45	混凝土浇筑	护底与扭王块交界面咬合力不足发生扭王块失稳
	东堤150~413 m段	45	20,45	20 t扭王块护底段发生整体失稳,45 t扭王块护底段护底个别失稳
调整方案4	南堤	60	整体混凝土浇筑	基本稳定
	转角	70	整体混凝土浇筑	基本稳定
	东堤30~<150 m段	60	整体混凝土浇筑	基本稳定
	东堤150~413 m段	45	整体混凝土浇筑	基本稳定
调整方案5	南堤	60	1.0~1.5,埋入式护底	少量护底块石翻滚至防波堤坡脚,护面块石稳定
	转角	60	1.0~1.5,埋入式护底	少量护底块石翻滚至防波堤坡脚。斜坡与堤顶连接区域个别60 t扭王字块体间隙加大,试验低→高→低水位完整循环后间隙未超过块体尺寸的1/2,护面块石稳定
	东堤30~<150 m段	60	1.0~1.5,埋入式护底	护底块石和护面块石稳定
	东堤150~413 m段	60	1.0~1.5,埋入式护底	护底块石和护面块石稳定



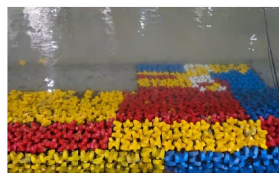
a) 调整方案1转角失稳



b) 调整方案1
东堤100~<150 m段失稳



c) 调整方案3转角失稳



f) 调整方案3
东堤100~<150 m段失稳



c) 调整方案2转角失稳



d) 调整方案2
东堤100~<150 m段失稳



g) 调整方案4转角稳定



h) 调整方案4
东堤100~<150 m段稳定

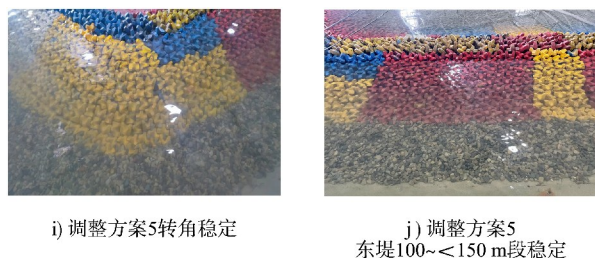


图 10 各调整方案稳定性状态

试验结果表明：调整方案 1 东堤护底设置 3 t 块石，护底和护面发生大面积失稳，见图 10a)、b)。由于 3 t 以上天然块石较少见，调整方案 2 东堤护底设置 9 t 扭王字块，试验结果部分护底块石失稳导致护面失稳，见图 10c)、d)。为提高试验效率，调整方案 3 沿堤分段采用不同护底形式，见图 11a)。试验结果采用 45 t 护底扭王字块仍有少量失稳，波浪的持续作用导致防波堤整体失稳，见图 10e)、f)。可见，通过增加护底块石质量以提高防波堤稳定性的效果不佳。为提高护底稳定性，加强护面与护底界面的咬合力，调整方案 4 护底采用整体混凝土浇筑，将最后一排扭王字块与护底块石整体浇筑，见图 11b)。试验结果表明，采用护底整体浇筑方案可有效提高防波堤整体稳定性，见图 10g)、h)。进一步验证了护底稳定对防波堤整体稳定的重要性。

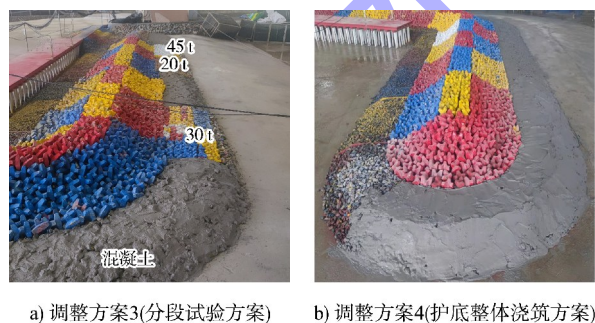


图 11 调整方案 3~5 的模型

由于水下混凝土浇筑技术目前还不够成熟。质量难以把控，无形成统一的质量标准。特别是在水动力较强海域，水下混凝土浇筑难度大，质量难以保证。因此，整体混凝土浇筑方案不考虑作为推荐方案。

调整方案 5 采用埋入式护底，见图 11c)。坡脚设 1.0~1.5 t 大块石护底，将中砂层开挖后，靠近护底的两排扭王字块与护底块石嵌入地基内，护底顶部和原泥面平齐。试验结果表明：极端高水位 50 a 一遇 SE 向浪作用下，转角处个别 60 t 扭王字块体间隙加大，间隙未超过块体尺寸的 1/2，南堤与转角少量护底块石翻滚至坡脚处，见图 10i)、j)。在设计高水位、设计低水位与极端低水位 50 a 一遇波浪作用下，防波堤各部分均保持稳定。

可见，采用埋入式护底结构形式有利于减小护底块石质量，提高护底块石的稳定性进而提高防波堤整体稳定性。采用埋入式护底提高护底稳定性原因为：1) 较明基床护底水深变大，波谷作用时水深较明基床大，卷破波对护底冲击能量有所变小；2) 水深变大沿堤流有所减小，有利于护底块石稳定；3) 加大了底部摩阻力，护底块石和垫层仅能在挖槽里小范围移动，不易被淘空，有利于稳定。

4.3.3 推荐方案

基于以上试验成果，结合以往防波堤破坏案例，考虑增加一定的安全富余，将入射波高提高 10%，对调整方案 5 进行稳定性试验。结果表明：极端高水位 50 a 一遇 SE 向浪+10%波浪作用下，少量护底随波浪作用向防波堤堤身处翻滚至防波堤堤脚，转角和东堤堤身护面扭王字块局部失稳。极端高水位 50 a 一遇 SSE 向浪+10%波浪作用下转角和堤头护面扭王字块局部失稳。

基于以上研究，推荐方案设置如下：南堤、东堤 0~<30 m 转角段，坡脚设 1.0~1.5 t 大块石护底，将中砂层开挖后，护底嵌入地基内，护底顶部和原泥面平齐，护面设置 70 t 扭王字块，内外坡结构相同，见图 12；东堤 30~<150 m 段，与南堤

断面结构区别在于内坡坡脚采用 600~800 kg 块石护底,设置于河床面上;东堤 150~<413 m 段,与南堤断面结构区别在于内外侧护面采用 60 t 扭

王字块体,内侧坡脚设 600~800 kg 块石护底,并设置于河床面上。

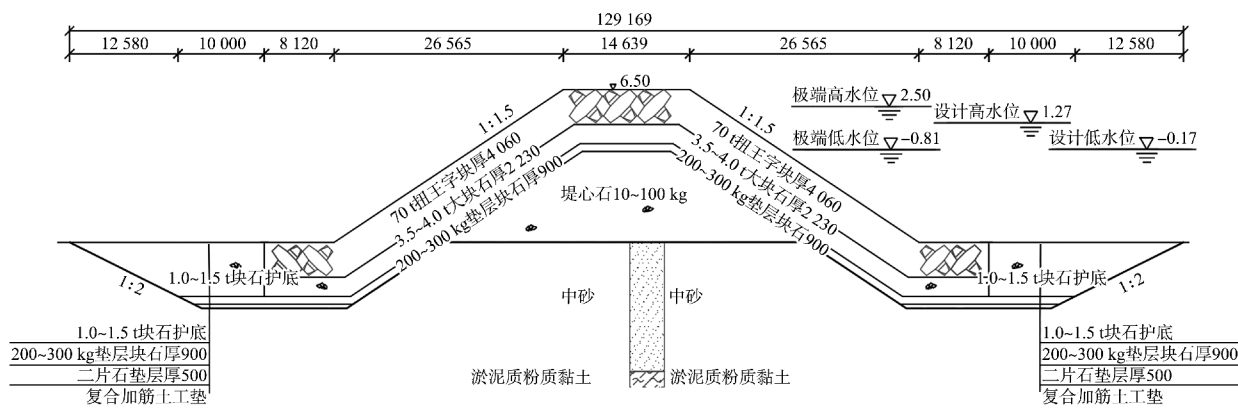


图 12 南堤与东堤 0~30 m 转角段断面结构 (尺寸: mm; 高程: m)

防波堤推荐方案采用埋入式护底结构形式,用于处于波浪破碎区的强浪海域时有较大优势,有利于减小护底块石质量,有效提高护底稳定性,达到防波堤整体稳定。解决了大质量护底块石来源少的问题,节省了工程投资。

5 结语

1) 波浪在堤前发生卷破,形成的卷破波会对护底造成极大冲击,护底块石大量翻滚至护面造成失稳,进而导致护面块石失稳。

2) 波浪断面物模试验无法模拟转角和东堤局部波能集中及斜向浪破碎引起的沿堤流现象,试验结果偏不安全。

3) 通过加大护底块石质量以到达护底稳定的效果不佳,采用埋入式护底结构,可减少卷破波和沿堤流对护底块石的冲击,加大底摩阻,有效提高护底块石稳定性,进而提高了防波堤的整体稳定。

参考文献:

[1] 王昊,张慈珩,刘海源,等.越南茶荣沿海港口波浪三维整体物理模型稳定性研究[J].水运工程,2022(12):62-67.

[2] 高峰,雷华,张慈珩,等.随机波浪作用下的防波堤三维稳定性及越浪量试验研究[J].水运工程,2015(10):50-56.

[3] 张华昌,董胜,张义佐,等.小角度斜向浪对接岸斜坡堤稳定影响的试验研究[J].海洋湖沼通报,2013(2):171-176.

[4] 戈龙仔,栾英妮,陈汉宝,等.斜向波作用下防波堤衔接段块体的稳定性和沉箱结构上波浪力试验研究[J].海洋通报,2021,40(1):113-120.

[5] 常梅,夏运强,张华昌,等.斜向浪作用下护面块体稳定重量的探讨[J].港工技术,2017,54(1):40-42,47.

[6] 赵云鹏,李玉成,马小舟,等.斜向浪作用下斜坡式防波堤上扭王字块体稳定性试验研究[C]//中国海洋工程学会.第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,612-615.

[7] 詹田进,魏振兴.抛石护底的稳定性分析[J].中国水运(下半月),2016,16(9):298-299.

[8] 刘慧芳,蒋华忠.浅水波作用下护底块石对斜坡式护岸稳定性影响[J].水运工程,2018(10):122-126.

[9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤与护岸设计规范:JTS 154—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[10] CUOMO G, ALLSOP W, BRUCE T, et al. Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters [J]. Coastal engineering, 2010, 57(4): 424-439.

(本文编辑 王聰)