



斜向浪作用下防波堤护面块体稳定性研究

陈立文, 付涛, 李珊珊, 杜冰茹

(广州打捞局, 广东 广州 510610)

摘要: 海南岛东南海岸建港条件恶劣, 防波堤稳定性是建港难题, 如何在强浪海域确保防波堤结构安全是工程成败的关键。依托海南万宁抢险打捞综合基地项目, 采用规范公式、波浪断面模型试验、波浪整体物理模型试验3种方法确定斜坡式防波堤扭王字块稳定质量, 验证防波堤稳定性。研究表明, 规范公式和波浪断面模型试验确定的扭王字块稳定质量远小于波浪整体模型试验确定的稳定质量, 主要原因在于波浪整体物理模型试验可有效反演沿堤局部发生波能集中效应, 局部波高变大致使防波堤护面扭王字块稳定质量需增大79%。因此, 对发生斜向浪作用的强浪海域, 开展波浪整体物理模型试验验证防波堤稳定性对确保设计安全有着重要意义。研究成果可为受斜向强浪作用下的防波堤工程设计提供参考。

关键词: 波浪断面模型试验; 波浪整体模型试验; 斜坡堤; 斜向卷破波

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0064-07

Stability analysis of breakwater armour blocks under action of oblique waves

CHEN Liwen, FU Tao, LI Shanshan, DU Bingru

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

Abstract: The southeastern coast of Hainan Island presents harsh conditions for harbor construction, with the stability of breakwaters posing a critical challenge. How to ensure the safety of breakwater structures in high-wave areas is pivotal for the success of the project. Based on the Wanning Emergency Salvage and Comprehensive Base Project in Hainan, this paper utilizes three methods—normative formulas, wave section model tests, and overall wave physical model tests to determine the stable weight of T-shaped blocks on a sloping breakwater and validate the breakwater's stability. The research findings reveal that the stable weight of the T-shaped blocks determined by normative formulas and wave section model tests is significantly lower than that determined by overall wave physical model tests. The main reason is that the overall wave physical model tests effectively reverse the locally concentrated wave energy effects along the embankment, causing a localized increase in wave height which necessitates a 79% increase in the stable weight of the T-shaped blocks on the breakwater's protective face. Therefore, for regions experiencing the impact of oblique waves in strong wave areas, it is of great significance to conduct overall wave physical model tests to verify breakwater stability for ensuring design safety. The research results can provide reference for the design of breakwater engineering subjected to oblique strong wave action.

Keywords: wave section model experiment; comprehensive wave model experiment; sloping breakwater; oblique breaking wave

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》4.3.7条明确指出, 对于设计波浪平均周期大于10 s时, 护面块体质量应适当加强并需进行模型试验验证, 但并未明确模型试验类型^[1]。孙一艳等^[2]对防波堤断面模型试验过程及注意事项进行了说明; 严

士常等^[3]通过抬高堤顶块石高程和减小堤后斜坡坡度两种方式提高护面块石的稳定性, 但未进行波浪整体物理模型试验, 而是将斜向入射波概化为正向入射波; 姜云鹏等^[4-5]和陈德旺等^[6]通过多个工程案例发现现行规范中护面块体稳定质量公

收稿日期: 2024-01-19

作者简介: 陈立文(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计。

式存在一定的局限性, 试验确定的稳定质量是公式计算值的 2~3 倍; 戈龙仔等^[7]在针对不同结构衔接段、斜向浪作用下的块体稳定性整体波浪物理试验中发现同样的现象, 特殊位置的护面块体稳定质量宜考虑增大系数; 常梅等^[8]和赵云鹏等^[9]通过断面和整体物理模型试验发现, 正向浪作用下的斜波堤护面块体稳定质量采用规范公式计算基本适用, 斜向浪作用下的护面块体更易出现失稳现象; 刘洋等^[10]和高峰等^[11]在进行断面和整体模型试验对比后发现, 三维整体试验更能真实模拟实际的工程情况。因此, 采用整体物理模型试验验证防波堤稳定性是非常必要的。

本文依托海南万宁抢险打捞综合基地防波堤实际工程, 结合该工程强浪且波浪发生卷破的特点, 开展斜坡式防波堤的波浪断面物理模型试验和整体物理模型试验, 确定扭王字块护面块体稳定质量并进行稳定性验证, 旨在不断优化斜坡堤结构形式, 最终达到结构稳定。

1 工程概况

万宁抢险打捞基地海域位于海南岛东部沿海万宁乌场一级渔港南侧, 项目所属海域为天然的凹形港湾, 见图 1。海域受 NE—SW 向季风及台风影响, 乌场湾外波浪表现为混合浪特征。本海域常浪向为 SE, 次常浪向 SSE。工程所在位置最大波高 9.45 m (已破碎), 周期 11.96 s。根据本工程波浪数学模型报告成果, 防波堤所在位置处的

试验波要素见表 1。为掩护本工程港池水域, 满足船舶靠泊作业要求, 拟布置东防波堤和南防波堤形成半环抱式港池(图 2), 其中东防波堤长 458 m, 西南走向, 堤顶高程由陆向海为 4.0~6.5 m, 东防波堤端部布置 242 m 南防波堤, 东西走向, 堤顶高程 6.5 m。码头布置于东防波堤内侧, 采用高桩结构, 长 272.1 m、宽 30 m、顶高程 4.8 m。

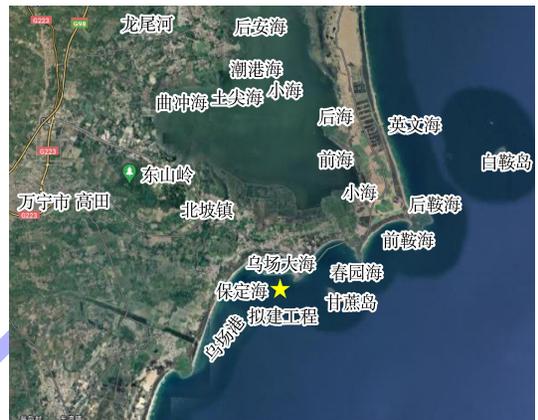


图 1 拟建项目位置



图 2 平面布置及波浪计算采样点分布 (单位: m)

表 1 东堤 T₄ 断面试验波要素

水位名称	水位/m	H _{1%} /m	H _{4%} /m	H _{5%} /m	H _{13%} /m	H/m	T _m /s
极端高水位	2.50	(9.45)	(9.45)	9.38	8.46	6.25	11.96
设计高水位	1.27	(8.61)	(8.61)	(8.61)	8.13	6.10	11.96
设计低水位	-0.17	(7.61)	(7.61)	(7.61)	(7.61)	5.94	11.96
极端低水位	-0.81	(7.17)	(7.17)	(7.17)	(7.17)	5.88	11.96

注:“()”为破碎波高。

2 试验方法及结果

2.1 块体稳定质量计算

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》第 4.3.7 条, 当波向线与斜坡堤纵轴线法线的夹角小于 22.5°且堤前波浪不破碎时, 单个块体稳

定质量可按式(1)计算。当波浪平均周期大于 10 s 时, 块体质量应适当加强并需进行模型试验研究。

$$W = 0.1 \times \frac{\gamma_b H^3}{K_b (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

$$S_b = \frac{\gamma_b}{\gamma} \quad (2)$$

式中： W 为单个块石、块体的稳定质量， t ； $\gamma_b = \rho_b g$ ， ρ_b 为块石、块体材料密度，取 2.3 g/cm^3 ； H 为设计波高， T_4 断面取 $H_{13\%}$ ，为 8.46 m ； K_D 为块体稳定系数，取 15 ； α 为斜坡与水平面的夹角， $(^\circ)$ ； $\gamma = \rho g$ ， ρ 为水的密度，取 1.025 g/cm^3 。

根据 4.3.18 条，位于波浪破碎区的堤身块体质量相应增加不少于 25%。经计算，单个块体稳定质量为 40.2 t ，平均周期大于 10 s ，块石质量适当取大，取 45 t 作为断面物理模型方案。

2.2 断面物理模型试验

2.2.1 试验设置

波浪断面物理模型试验在交通运输部天津水

运工程科学研究院试验大厅进行。波浪断面物理模型水槽长 68 m 、宽 1 m 、高 1 m 。防波堤断面采用抛石斜坡堤结构进行东防波堤的典型断面试验。堤顶高程 6.5 m ，天然泥面高程 -11.2 m ；护面块体采用 45 t 扭王字块；海侧坡脚棱体采用 $800 \sim 1\,000 \text{ kg}$ 块石，港内侧坡脚棱体采用 $300 \sim 500 \text{ kg}$ 块石；港内侧和海侧护底均为 $2 \sim 3 \text{ t}$ 大块石，垫层为 $100 \sim 200 \text{ kg}$ 块石，堤心为 $10 \sim 100 \text{ kg}$ 块石，见图 3。模型按正态重力相似准则设计，结构断面满足几何相似、重力相似和其他相关比尺的要求。试验模拟几何比尺 39.5 ，即波高比尺为 39.5 ，周期比尺为 6.3 ，断面物理模型见图 4，试验前模型俯视图见图 5。进行各断面稳定性试验时，每个水位条件下模拟原体波浪作用时间取 3 h 。

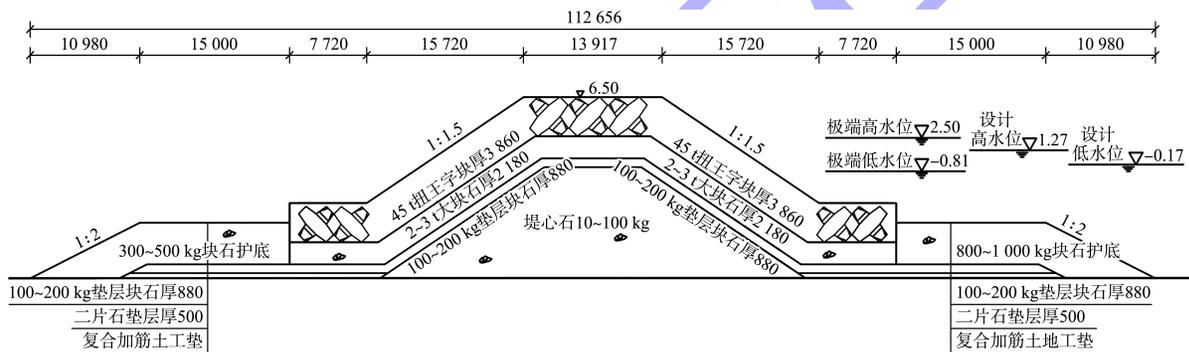


图 3 断面结构 (尺寸: mm; 高程: m)



图 4 断面物理模型



图 5 试验前模型

2.2.2 试验结果

如图 6、7 所示，断面物理模型试验在极端高水位和设计高水位情况下少量坡脚护底块石发生滚动，堤顶 45 t 扭王字块间距扩大但未超出半倍块体边长，断面结构处于临界稳定状态。

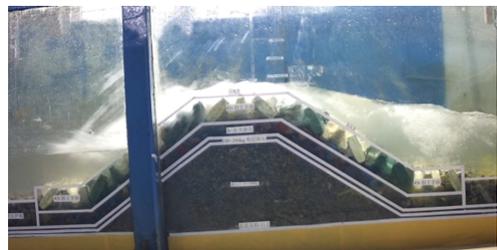


图 6 极端高水位下试验工况



图 7 试验后模型

2.3 波浪整体物理模型试验

2.3.1 试验设置

如图 8 所示, 波浪整体物理模型试验在交通运输部天津水运工程科学研究所临港试验大厅进行, 水池长 87 m、宽 42 m、高 1 m, 试验有效区域长 40 m、宽 42 m、高 1 m。波浪整体物理模型采用正态、定床模型, 模型设计满足几何相似、重力相似和其他相关比尺的要求。整体试验模拟几何比尺为 48, 即波高比尺为 48、周期比尺为 6.92。整体稳定性试验在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。断面物理模型试验 T_4 断面对应东防波堤 (150~430 m)。在开展整体物理模型前, 进行了三维波浪局部物理模型预试验, 结果表明南堤、转角及东防波堤 0~150 m 段 45 t 护面大面积失稳。可见规范计算稳定质量 45 t 扭王字块未能满足稳定要求, 需将南堤—东防波堤 150 m 调整为 60 t 扭王字块。原设计方案见表 2, 模型试验先进行 SE 向试验, 待稳定后进行 SSE 和 S 向试验。



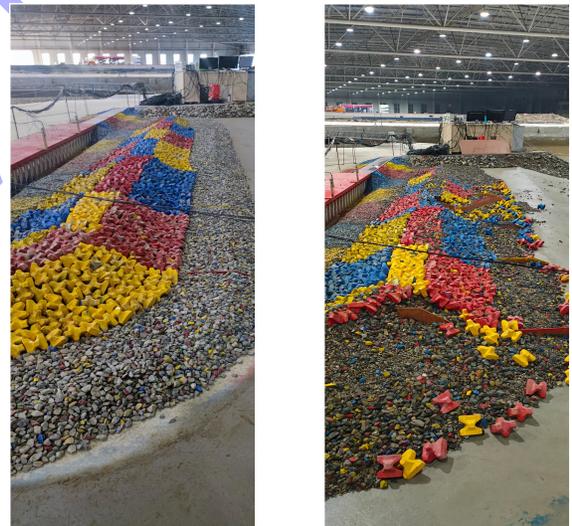
图 8 波浪整体物理模型

表 2 护面块体稳定质量计算

护面位置	H/m	规范计算 稳定质量/t	原方案护面 扭王字块质量/t
南防波堤外侧	8.79	45.1	60
东防波堤(0~150 m)	8.51	40.8	60
东防波堤(150~430 m)	8.46	40.1	45

2.3.2 试验结果

极端高水位 SE 向浪作用 3 h 后, 转角和东堤 (0~430 m) 护面和护底整体失稳, 试验前后对比见图 9。试验过程中, 大量护底块石在卷破波作用下翻滚至堤身甚至越过堤顶, 在护底和护面交界面上扭王字块发生失稳并在斜向浪作用下发生沿堤移动。试验过程加大转角扭王字块至 70 t, 护底块石从 1.5 t 加大至 9.0 t, 东堤(0~150 m) 扭王字块 60 t, 护底块石加大至 9.0 t, 转角及东堤(0~150 m) 均发生失稳。可见, 断面物理模型试验正向浪情况下 45 t 扭王字块护面和 1.0~1.5 t 块石护底方案临界稳定, 而在整体物理模型试验斜向浪作用下护面 70 t 扭王字块和 9.0 t 扭王字块护底方案仍发生失稳。因此, 护底稳定性对防波堤整体稳定性起到关键作用, 需采取工程措施先稳护底。



a) 试验前

b) 试验后

图 9 原方案东防波堤试验前后对比

防波堤破坏过程是护底块石被大量卷至堤身后导致护面块体整体失稳, 因此对护底结构采取优化措施, 将护底块石由高于床面调整至嵌入地基内, 护底块石顶部与泥面齐平, 减少卷破波对护底的冲击力, 优化后护底块石取 1.0~1.5 t, 南堤护面—东堤(0~150 m) 采用 70 t 扭王字块, 东堤(150~430 m) 采用 60 t 扭王字块。该优化方案在整体物理模型试验全工况下保持稳定, 优化后南堤及东堤(0~150 m) 结构断面见图 10。

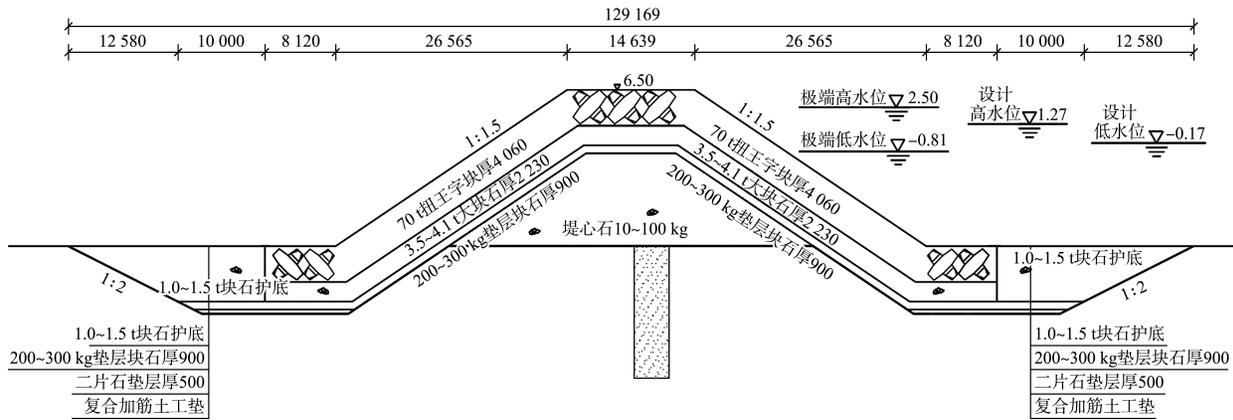


图 10 南堤及东堤 (0~150 m) 结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

3 试验结果分析

3.1 原因分析

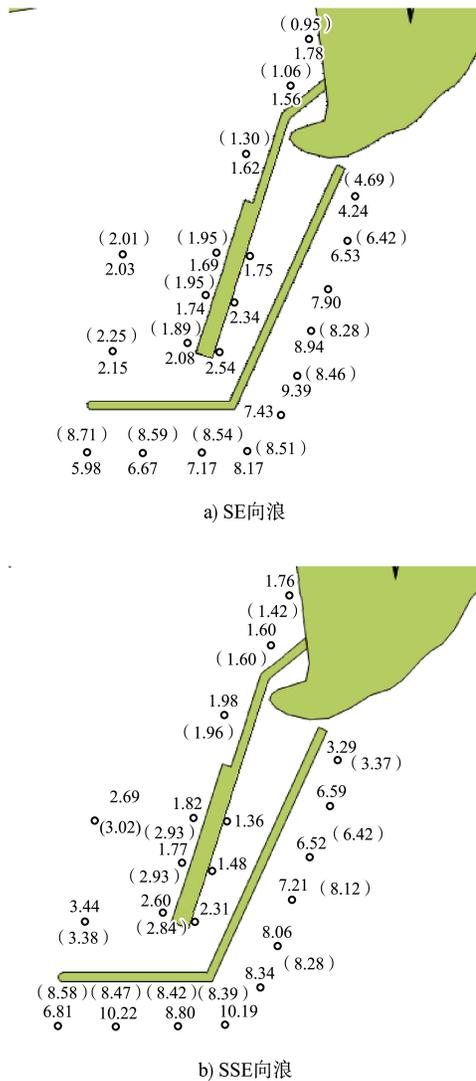
由以上结果可知,规范计算公式和断面物理模型均采用设计波高 8.45 m 作为计算波高和试验波高,结果显示断面物理模型护面扭王字块 45 t 可达到临界稳定,比采用计算公式计算的稳定质量 40.2 t 略大 12%。而整体物理模型试验结果表明,在不优化护底结构形式时护面扭王字块达到 70 t 也发生失稳。整体物理模型试验得到的稳定质量远超过断面物理模型得到的稳定质量,主要原因为:断面物理模型仅能模拟正向浪入射,无法模拟斜向浪入射导致的波能集中现象。实际海况中不规则波入射方向基本不会集中在一个方向,难以保证波浪是正向作用于防波堤。JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》4.3.8 提出斜向波入射时,护面采用块石的稳定质量可适当折减,该条款针对同一设计波高是适用的,但忽略了当波浪斜向入射时,防波堤沿堤波能会重新分配,局部发生波能集中,导致波高超过原来的设计波高。本工程断面物理模型采用的设计波高是波浪数学模型计算的设计波高,计算时未考虑波浪破碎引起增水及波浪反射与入射波的叠加现象,无法模拟波能集中现象。整体物理模型可较好反应

出防波堤前沿的波能集中效应。

如图 11 所示,从 SE、SSE 方向的整体物理模型和数学模型堤前 50 a 一遇 $H_{13\%}$ 对比可见,在东堤约 150 m 处、转角段及南堤 200 m 处均出现了波能集中、波高增大现象,其中东堤约 150 m 处 SE 向浪原 8.46 m 的设计波高在整体物理模型试验中增大为 9.39 m,转角处 SSE 向浪原 8.39 m 的设计波高在整理物理模型试验中增大为 10.19 m,南堤 200 处 SSE 向浪原 8.47 m 的设计波高在整体物理模型试验中增大为 10.22 m。根据增大后波高重新按照经验公式计算扭王字块的稳定质量,见表 3。可见,东堤约 150 m 处扭王字块稳定质量从 40.2 t 增大到 55.0 t,增大 36%,推荐方案采用 60 t;转角处扭王字块稳定质量从 40.8 t 增大到 70.2 t,增大 72%,推荐方案采用 70 t;南堤 200 m 处扭王字块稳定质量从 40.3 t 增大到 70.9 t,增大 76%,推荐方案采用 70 t。参考前人的研究成果可知,斜向浪入射导致的波能集中现象在工程设计中不容被忽视,波能集中的薄弱环节需大大增加护面块石稳定质量。根据整体物理模型试验所得设计波高计算的扭王字块稳定质量比根据数学模型所得设计波高计算的稳定质量更接近实际需要,同时式(1)计算的稳定质量需在护底结构稳定的前提下使用。

表 3 规范公式计算的扭王字块稳定质量对比

位置	原数学模型计算波高/m	整体物理模型试验波高/m	原设计波高计算稳定质量/t	试验波高计算稳定质量/t
东堤(150 m)	8.46	9.39	40.2	55.0
转角	8.51	10.19	40.8	70.2
南堤(200 m)	8.47	10.22	40.3	70.9



注: 括号中为数学模型结果, 括号外为整体物理模型结果。

图 11 极端高水位 50 a 一遇波浪作用下港内外 $H_{13\%}$ 分布 (单位: m)

综上所述, 通过整体物理模型试验可真实反演斜向浪的波能集中现象, 可以有效发现防波堤的薄弱环节, 是确保防波堤工程结构安全可靠的必要手段。

3.2 与前人成果对比分析

本工程案例原块石计算稳定质量为 40.8 t, 断面物理模型确定 45 t 扭王字块可达到稳定; 而在整体物理模型中, 在采取优化护底结构工程措施稳住护底的前提下, 扭王字块需达到 70 t 才稳定, 即实际需要的扭王字块稳定质量较规范计算的稳定质量增大 75%。类似工程案例还有很多:

1) 文献[4]中, 在斜坡堤与沉箱交界段设计波高 4 m, 规范计算的扭王字块质量为 10 t, 斜向浪作用下三维稳定试验结果需加大到 20 t, 且配合规则摆放、增加棱体支撑的工程措施。

2) 文献[5]中, 护岸设计波高 5.5 m, 规范计算的扭王字块质量为 15 t。斜向浪作用且波浪发生破碎情况下, 三维稳定试验结果靠近底部扭王字块需加到至 35 t, 且配合增加护岸底部块体支撑排数措施。

3) 文献[8]中, 护岸设计波高 3.62 m, 规范计算的四脚空心方块稳定质量为 2.1 t。斜向浪作用下, 整体物理模型试验的四脚空心方块质量需达到 4 t 才可稳定。

综上, 前人研究表明, 斜向浪作用下护面块石的稳定质量基本可增大 1 倍, 本工程在采取护底结构优化措施后, 护面增大 75%, 与前人研究结果基本相符。在增大护面块石质量的同时, 可通过采取相应优化措施如加强护底稳定性、护底与护面咬合力及规则摆放等措施有效减小护面块石稳定质量。

3.3 试验方法优势对比

以上研究表明, 本工程采用规范公式计算的扭王字块稳定质量和断面物理模型试验稳定质量之所以比整体物理模型试验小很多, 主要是设计波高取值太小。若在数学模型计算过程中能有效反演波能集中现象, 选取准确的设计波高, 断面物理模型试验也可以提供可信的结果。

断面物理模型和整体物理模型试验均有各自优势, 需根据工程特点及关注问题选取合适的模型试验。表 4 列出了 2 种模型试验的优势对比。相比断面物理模型, 整体物理模型优势明显, 可对港内外波高分布及整个防波堤各部位的稳定性进行评估, 但由于整体物理模型试验费用较高, 研究时间较长, 无条件开展整体物理模型的工程可考虑采用数学模型手段+断面物理模型试验结合的方法。采用数学模型模拟提前波浪时, 需充分考虑波能集中效应导致的波高局部增大现象。

表4 断面物理模型和整体物理模型试验优势对比

试验类型	优势	劣势	解决的主要问题
断面物理模型	1) 验证护面护底块石稳定性, 观测越浪情况, 测量堤后次生波; 2) 比尺较整体物模大, 较客观反映波浪与结构的相互作用; 3) 费用较整体物模低, 试验效率高, 可作多个结构方案对比	1) 仅能模拟正向浪入射, 无法考虑斜向浪作用; 2) 在堤头和转弯处反映不了实际情况; 3) 需根据沿堤浪分布进行多断面试验提高精度; 4) 无法模拟港内绕射浪及次生波的叠加情况	1) 验证堤身断面块石稳定性, 观测防波堤越浪情况及测量堤后次生波; 2) 与整体物理模型结果相互验证
整体物理模型	1) 模拟不同入射波向的工况, 特别是斜向浪的作用; 2) 模拟堤后次生浪与绕射浪叠加效应; 3) 观测港内波高分布情况及测量港内不同位置的波高	1) 比尺较断面物模小, 正向波浪与结构物相互作用较断面物模精度低; 2) 试验费用较高, 建模时间长, 研究时间周期长, 模拟多个结构方案成本高	整体评估防波堤各个部位稳定情况、越浪情况和港内各工况波高叠加分布

4 结论

1) 整体物理模型试验可客观反演斜向浪的沿堤波能集中效应, 有利于发现防波堤的薄弱环节。

2) 采用波能集中段波高作为设计波高, 套用规范计算公式确定护面块石稳定质量比波浪数模模型提供的设计波高更接近实际, 前提是护底结构稳定。

3) 通过优化防波堤结构断面, 将护底埋入河床, 有利于增大护底的稳定性, 该工程措施对堤前发生卷破波导致护底大量卷至护面的情况非常有效。

4) 波能沿堤分布的机制和规律有待进一步研究, 若通过波浪数学模型手段可有效反演波能集中现象, 提供准确的堤前设计波高, 规范计算公式及断面物理模型均可提供可信的稳定质量。

参考文献:

[1] 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.

[2] 孙一艳, 柳淑学, 张建侨, 等. 防波堤断面模型试验概述[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(3): 112-114.

[3] 严士常, 王广生, 陈国平, 等. 加纳特马新港防波堤断面

优化试验研究[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(11): 37-42.

[4] 姜云鹏, 陈汉宝. 三维稳定试验在识别港口防浪结构设计薄弱环节中的作用[C]//海洋工程学会. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2017: 1070-1076.

[5] 姜云鹏, 张焱, 郑子龙. 波浪作用下护岸三维稳定试验研究[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 15-18.

[6] 陈德旺, 刘海源. 斜向波作用宽肩台式防波堤稳定性试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(4): 451-456.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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]//中国海洋学会海洋工程分会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2009: 600-603.

[10] 刘洋, 刘针, 胡朔, 等. 护岸修复稳定性的二维与三维模型试验研究对比[J]. 中国水运(上半月), 2021(5): 83-86.

[11] 高峰, 张华平, 周加杰, 等. 印尼 KARANG TARAJE 港防波堤工程波浪整体模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(9): 20-23, 35.

(本文编辑 王传瑜)