

JTJ

中华人民共和国行业标准

JTJ/T 234—2001

波浪模型试验规程

Wave Model Test Regulation

2001 - 12 - 25 发布

2002 - 05 - 01 实施

中华人民共和国交通部发布

中华人民共和国行业标准

波浪模型试验规程

JTJ/T 234—2001

主编单位：南京水利科学研究院

批准部门：中华人民共和国交通部

施行日期：2002 年 5 月 1 日

关于发布《波浪模型试验规程》 (JTJ/T 234—2001)的通知

交水发[2001]773 号

各省、自治区、直辖市交通厅(局、委),长江、珠江航务管理局及有关企事业单位:

由我部组织南京水利科学研究院等单位修订的《波浪模型试验规程》,已经审查通过,现批准为推荐性行业标准,编号为 JTJ/T 234—2001,自 2002 年 5 月 1 日起施行。《波浪模型试验规程》(JTJ 301—88)(试行)同时废止。

本规程由交通部水运司负责管理和解释,由人民交通出版社出版发行。

中华人民共和国交通部

二〇〇一年十二月二十五日

修 订 说 明

本规程是在《波浪模型试验规程》(JTJ 301—88)(试行)的基础上编制而成。主要包括:波浪模型试验的基本规定、整体和断面物理模型试验、桩基和墩柱建筑物及水下管线物理模型试验、浮式建筑物物理模型试验、波浪泥沙物理模型试验和波浪数值模拟等技术内容。本规程主编单位为南京水利科学研究院,参加单位为大连理工大学和天津港湾工程研究所。

《波浪模型试验规程》(JTJ 301—88)(试行)自 1988 年实施以来,对统一波浪模型试验技术要求和分析方法发挥了积极的作用。随着我国海岸及港口工程建设的迅速发展,以及模型试验技术的进步,对波浪模型试验提出了一些新的要求,《波浪模型试验规程》(JTJ 301—88)(试行)的内容在深度和广度上已与当前的形势不相适应。为统一和规范波浪模型试验新的技术要求,促进研究质量的提高,需要对《波浪模型试验规程》(JTJ 301—88)(试行)进行补充和修订。为此,交通部水运司组织南京水利科学研究院等单位在进行大量地调查研究、总结近 10 余年来国内外波浪模型试验技术的实践经验、广泛征求有关单位和专家意见的基础上,对《波浪模型试验规程》(JTJ 301—88)(试行)进行了修订。

本规程共分 9 章 31 节及 7 个附录,并附条文说明。本规程编写人员分工如下:

- 1 总则:左其华 杨正己
- 2 术语:杨正己 贺辉华 王鉴义
- 3 波浪物理模型试验的基本规定:杨正己 俞聿修 陈国平
张馥桂 刘子琪
- 4 整体物理模型试验:张馥桂 杨正己 左其华 黄海龙

5 斜坡式和直墙式建筑物断面物理模型试验:刘子琪 杨宪章

6 桩基和墩柱建筑物及水下管线物理模型试验:俞聿修

7 浮式建筑物物理模型试验:王凤龙

8 波浪泥沙物理模型试验:杨正己

9 波浪数值模拟:左其华 潘军宁 王红川 丁炳灿

附录 A、附录 B:陈国平 潘军宁

附录 C:潘军宁 王红川 丁炳灿

附录 D:刘子琪 杨宪章

附录 E、附录 F:左其华 潘军宁 王红川 丁炳灿

附录 G:黄海龙

附加说明:杨正己

本规程于 2001 年 7 月 20 日通过部审,于 2001 年 12 月 25 日发布,2002 年 5 月 1 日起实施。

本规程由交通部水运司负责管理和解释。请有关单位在使用本规程过程中,将发现的问题和意见及时函告交通部水运司和本规程管理组,以便修订时参考。

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 波浪物理模型试验的基本规定	5
3.1 一般规定	5
3.2 相似准则	6
3.3 波浪与水流模拟	9
3.4 试验设备和测量仪器	11
3.5 试验数据采集和处理	12
4 整体物理模型试验	16
4.1 一般规定	16
4.2 边界条件模拟	16
4.3 波浪传播与变形模型试验	17
4.4 港内水域平稳度模型试验	17
4.5 船行波模型试验	18
5 斜坡式和直墙式建筑物断面物理模型试验	19
5.1 一般规定	19
5.2 斜坡式建筑物断面模型试验	20
5.3 宽肩台式抛石防波堤断面模型试验	21
5.4 直墙式建筑物断面模型试验	22
5.5 越浪量和波浪爬高试验	23
6 桩基和墩柱建筑物及水下管线物理模型试验	24
6.1 一般规定	24
6.2 桩基和墩柱建筑物模型试验	24
6.3 带梁板透空建筑物模型试验	26

6.4 水下管线模型试验	26
7 浮式建筑物物理模型试验	27
7.1 一般规定	27
7.2 浮式防波堤模型试验	27
7.3 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型试验	28
8 波浪泥沙物理模型试验	30
8.1 一般规定	30
8.2 沿岸输沙的波浪泥沙模型试验	30
8.3 岸滩横剖面的波浪泥沙模型试验	31
8.4 建筑物附近底床局部冲刷模型试验	33
9 波浪数值模拟	35
9.1 一般规定	35
9.2 风浪数值模拟	35
9.3 开敞水域波浪传播数值模拟	36
9.4 港内水域波浪传播数值模拟	37
9.5 波浪力数值模拟	37
附录 A 不规则波试验数据统计分析	39
附录 B 随机数据时间序列的谱分析	43
附录 C 随机数据时间序列的互谱分析	47
附录 D 单向波合成多向波模型试验	51
附录 E 波浪折射数学模型	53
附录 F Helmholtz 方程边界元法	57
附录 G 本规程用词用语说明	61
附加说明 本规程主编单位、参加单位、主要起草人、 总校人员和管理人员名单	62
附 条文说明	65

1 总 则

1.0.1 为统一波浪模型试验技术要求和分析方法,提高研究成果的可靠性,为水运工程建设提供科学依据,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于海岸、近海和内陆水域等水运工程的波浪、波浪与水流,及其与建筑物、岸滩等相互作用的物理模型试验和数值模拟试验。

1.0.3 波浪模型试验除应符合本规程外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 波浪模型

模拟波浪为主要动力因素及其与建筑物、岸滩等相互作用的模型,包括物理模型和数值模拟两种方法。

2.0.2 物理模型

将研究对象按一定的相似准则缩制而成的实体模型。

2.0.3 数值模拟

针对研究对象和需要解决的问题,采用合适的数学物理方程,按定解条件进行数值求解的方法。

2.0.4 模型比尺

原型与模型各对应物理量间的比值。

2.0.5 正态模型

水平长度比尺与垂直长度比尺相等的模型。

2.0.6 变态模型

水平长度比尺与垂直长度比尺不相等的模型。

2.0.7 模型的变率

模型水平长度比尺和垂直长度比尺的比值。

2.0.8 几何相似

模型与原型的线性尺度之间成固定比例关系。

2.0.9 运动相似

模型与原型各相应的速度、加速度的比值相等,且方向相同。

2.0.10 重力相似

模型与原型的惯性力和重力在相应方向上的分量比值相等。

2.0.11 弹性相似

模型与原型的惯性力和弹性力在相应方向上的分量比值相

等。

2.0.12 相似准则

模型与原型的物理现象保持相似所必须遵守的规则。

2.0.13 规则波

波高、波周期不变的波浪。

2.0.14 不规则波

波高、波周期随机变化的波浪。

2.0.15 单向不规则波

单一方向传播的不规则波,又称二维不规则波。

2.0.16 多向不规则波

多方向传播的不规则波,又称三维不规则波。

2.0.17 频率谱

波浪能量随频率变化的分布。

2.0.18 方向谱

波浪能量随频率和方向变化的分布。

2.0.19 方向分布函数

表征波能沿方向分布规律的函数。

2.0.20 谱峰频率

频率谱密度峰值相对应的频率。

2.0.21 波能

波动水体所具有的动能和势能。

2.0.22 波面

波动水体的自由表面。

2.0.23 波峰线

垂直于波浪传播方向相邻的波峰顶点的连线。

2.0.24 造波机二次反射

来自模型建筑物及试验水槽或水池壁的反射波传至造波机后再次发生的反射。

2.0.25 波群

波列中大于某一波高的若干连续出现的波浪。

2.0.26 比波高

测点波高与原始入射波高或指定控制点波高的比值。

2.0.27 沿岸输沙

在波浪和水流作用下形成的沿岸方向的泥沙输移。

2.0.28 岸滩横剖面

与岸线垂直的岸滩剖面。

2.0.29 验证试验

为检验和校正模型与原型相似程度的试验。

2.0.30 线性波

流体动力学方程和边界条件中只保留线性项所描述的波浪。

2.0.31 非线性波

流体动力学方程和边界条件中,除线性项外,尚保留二阶或高阶项所描述的波浪。

2.0.32 边界条件

物理模型试验和数值模拟中边界上的控制条件。

2.0.33 初始条件

数值模拟中起始时的控制条件。

3 波浪物理模型试验的基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 波浪模型试验应根据工程规划和设计要求选用物理模型试验或数值模拟试验。必要时,应同时进行物理模型试验和数值模拟试验。

3.1.2 波浪模型试验中所研究的问题能简化为二维时,可采用断面模型;当研究的问题不能简化为二维时,应采用整体模型。

3.1.3 波浪模型试验前,应根据试验任务的要求编制试验大纲。试验大纲应包括下列内容:

- (1)试验依据和遵守的技术标准;
- (2)项目概况,试验目的、内容和要求;
- (3)试验依据的基本资料,试验方法和实施方案;
- (4)试验设备和测量仪器;
- (5)主要试验人员、试验进度计划、预期的目标和试验结果。

3.1.4 在物理模型试验前,应对试验设备和测量仪器进行校验。

3.1.5 试验成果报告应按下列格式编写:

- (1)封面,包括试验成果的名称、承担单位、参加单位和编制日期;
- (2)扉页,包括法人代表、技术主管、项目负责人、报告编写人和试验参加人员;
- (3)摘要,简述试验目的和方法及试验主要结论;
- (4)目次,包括试验成果报告的章、节名称和起始页码;
- (5)正文;
- (6)参考文献。

3.1.6 试验成果报告的正文应包括下列内容:

- (1)引言,包括试验的背景、目的和采取的技术路线等;
- (2)试验依据的基本资料,包括工程概况、工程布置、建筑物结构、水位、波浪、地形及其它水文、气象、泥沙和地质等资料;
- (3)试验内容和技术要求;
- (4)模型设计或数值模拟方法,包括物理模型的相似条件、模型比尺的选择、模型的布置及试验设备和测量仪器等;数值模拟的基本控制方程、边界条件、求解方法、离散格式和参数的确定;
- (5)模型制作,包括图纸资料、边界和制作精度;
- (6)试验结果分析;
- (7)结语,包括试验主要结果、存在的问题及建议。

3.1.7 进行验证试验的项目,其试验成果报告的正文应包括验证试验相似性和合理性的内容。

3.2 相似准则

3.2.1 波浪物理模型试验宜采用正态模型。

3.2.2 正态模型的长度比尺应满足下列要求。

3.2.2.1 断面物理模型长度比尺应符合表 3.2.2 的规定。

断面物理模型长度比尺

表 3.2.2

建筑物型式	模型长度比尺 λ
斜坡式、直墙式、水下管线	≤ 40
桩基、墩柱	≤ 60
浮式	≤ 80

3.2.2.2 整体物理模型长度比尺不应大于 150。当有船舶模型置于其中时,模型长度比尺不应大于 80。船行波试验时,模型长度比尺不宜大于 30。

3.2.2.3 模型的原始入射波,规则波波高不应小于 2cm,波周期不应小于 0.5s;不规则波有效波高不应小于 2cm,谱峰值周期不应小于 0.8s。

3.2.3 模型设计应根据波浪等动力因素及其与建筑物、岸滩等相互作用的特点,采用不同的相似准则,并应符合下列规定。

3.2.3.1 波浪、波浪与水流及其与建筑物、岸滩等相互作用的模型设计,应满足重力相似,其比尺按下列公式确定:

$$\lambda = \frac{l_p}{l_m} \quad (3.2.3-1)$$

$$\lambda_t = \lambda^{1/2} \quad (3.2.3-2)$$

$$\lambda_f = \lambda^{-1/2} \quad (3.2.3-3)$$

$$\lambda_u = \lambda^{1/2} \quad (3.2.3-4)$$

$$\lambda_p = \lambda \quad (3.2.3-5)$$

$$\lambda_F = \lambda^3 \quad (3.2.3-6)$$

$$\lambda_Q = \lambda^{5/2} \quad (3.2.3-7)$$

$$\lambda_q = \lambda^{3/2} \quad (3.2.3-8)$$

$$\lambda_E = \lambda^4 \quad (3.2.3-9)$$

式中 λ ——模型长度比尺;

l_p ——原型长度;

l_m ——模型长度;

λ_t ——时间比尺;

λ_f ——频率比尺;

λ_u ——速度比尺;

λ_p ——压强比尺;

λ_F ——力比尺;

λ_Q ——流量比尺;

λ_q ——单宽流量比尺;

λ_E ——能量比尺。

3.2.3.2 波浪与斜坡式、直墙式建筑物相互作用的建筑物模型设计,应满足几何相似。与稳定性试验有关的建筑物构件的模型设计,除应满足几何相似外,尚应满足质量、重心位置相似。

3.2.3.3 波浪与浮式建筑物相互作用的建筑物和船舶的模型设计,除应满足几何相似外,尚应满足惯性矩和自摇周期相似,其锚系结构尚应满足长度、质量和弹性相似。

3.2.3.4 波浪与桩基、墩柱建筑物和 underwater 管线相互作用的建筑物及其构件的模型设计,应满足与原型几何相似,当速度力起主要作用时,应分析雷诺数的影响;当桩和 underwater 管线模型刚度较小时,应计入弹性影响。

3.2.3.5 波浪作用下系泊船舶对码头撞击力的护舷模型设计,应满足弹性相似。

3.2.4 当整体物理模型的试验条件受到限制时,可采用变态物理模型。变态物理模型试验应符合下列要求。

3.2.4.1 变态整体物理模型设计,应根据现场资料和试验要求进行分析,满足主要相似条件,合理选择模型比尺,并应对相似条件进行验证。

3.2.4.2 变态整体物理模型应按重力相似设计,模型的变率应根据不同条件及要求选取,但不应大于 5。

3.2.4.3 变态整体物理模型设计应满足下列要求:

(1)以波浪折射为主时,波长、波周期和时间比尺按下列公式确定:

$$\lambda_L = \lambda_h \quad (3.2.4-1)$$

$$\lambda_T = \lambda_h^{1/2} = \lambda_L^{1/2} \quad (3.2.4-2)$$

$$\lambda_t = \lambda_T \quad (3.2.4-3)$$

式中 λ_L ——波长比尺;

λ_h ——模型垂直长度比尺;

λ_T ——波周期比尺;

λ_t ——时间比尺。

(2)以波浪绕射为主时,波长、波周期和时间比尺按下列公式确定:

$$\lambda_L = \lambda_l \quad (3.2.4-4)$$

$$\lambda_T = \left[\frac{\lambda_L}{\lambda \left(\tanh \frac{2\pi h}{L} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.4-5)$$

$$\lambda_t = \lambda_T \quad (3.2.4-6)$$

式中 λ_L ——波长比尺；

λ_l ——模型水平长度比尺；

λ_T ——波周期比尺；

$\lambda \left(\tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$ ——原型与模型的 $\tanh \frac{2\pi h}{L}$ 之比；

h ——水深；

L ——波长；

λ_t ——时间比尺。

(3)研究波浪反射时,建筑物模型和边界的反射系数与原型一致。

3.3 波浪与水流模拟

3.3.1 波浪和水流的模拟应满足重力相似准则。

3.3.2 波浪模型试验宜模拟单向不规则波。必要时,应模拟多向不规则波。单向不规则波和多向不规则波的模拟应满足下列要求。

3.3.2.1 单向和多向不规则波宜模拟工程水域的实测波谱。无实测波谱时,可采用现行行业标准《海港水文规范》(JTJ 213)中规定的波谱或其它合适的波谱。必要时,应模拟波列及波群。

3.3.2.2 单向不规则波模拟的允许偏差应满足下列要求:

- (1)波能谱总能量的允许偏差为 $\pm 10\%$;
- (2)峰频模拟值的允许偏差为 $\pm 5\%$;
- (3)在谱密度大于或等于 0.5 倍谱密度峰值的范围内,谱密度分布的允许偏差为 $\pm 15\%$;
- (4)有效波高、有效波周期或谱峰周期的允许偏差为 $\pm 5\%$;
- (5)模拟的波列中 1% 累积频率波高、有效波高与平均波高比

值的允许偏差为 $\pm 15\%$ 。

3.3.2.3 多向不规则波宜按频率、方向对应法模拟波面,并按下列公式进行模拟:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I a_{mi} \cos[\omega_{mi} t - k_{mi}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) + \epsilon_{mi}] \quad (3.3.2-1)$$

$$a_{mi} = \sqrt{2S(\omega_m, \theta_i) \Delta \omega \Delta \theta} \quad (3.3.2-2)$$

$$\omega_m = \omega_L + \left(m - \frac{1}{2}\right) \Delta \omega \quad (3.3.2-3)$$

$$\Delta \omega = \frac{\omega_H - \omega_L}{M} \quad (3.3.2-4)$$

$$\theta_i = \theta_{\min} + \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta \theta \quad (3.3.2-5)$$

$$\Delta \theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{I} \quad (3.3.2-6)$$

$$\omega_{mi} = \omega_m - \frac{1}{2} \Delta \omega + \frac{(i-1 + R_{mi}) \Delta \omega}{I} \quad (3.3.2-7)$$

式中 $\eta(x, y, t)$ ——波动水面相对于静水面的瞬时高度(m);

x, y, t ——分别为波动水面的水平位置(m)和时间(s);

M ——频域分割数,通常取 50 ~ 100;

I ——方向等分数,通常取 20;

a_{mi} ——第 m 个频率、第 i 个方向的组成波振幅(m);

ω_{mi}, k_{mi} ——第 m 个频率、第 i 个方向的组成波圆频率(rad/s)和波数(rad/m);

θ_i ——第 i 个组成波的方向角(rad);

ϵ_{mi} ——第 m 个频率、第 i 个方向的组成波初相位,在 $(0, 2\pi)$ 域内均布的随机数(rad);

$S(\omega_m, \theta_i)$ ——圆频率为 ω_m 、方向为 θ_i 的方向谱密度 [$\text{m}^2/(\text{Hz} \cdot \text{rad})$];

$\Delta\omega$ ——圆频率分割点间隔(rad/s);

$\Delta\theta$ ——方向等分点间隔(rad);

ω_H, ω_L ——分别为频谱的最高、最低圆频率(rad/s);

$\theta_{\max}, \theta_{\min}$ ——分别为方向谱的最大、最小方向角(rad);

R_{mi} ——第 m 个频率、第 i 个方向的组成波在(0,1)域内均布的随机数。

3.3.3 当波浪模型试验采用规则波时,规则波平均波高和波周期的允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

3.3.4 水流的模拟应包括流速和流向的模拟。水流平均流速的允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。模型区的水流应保持平稳,流向应与原型一致。

3.3.5 波浪和水流共同作用时,波浪和水流应采用同一比尺,并应符合下列规定。

3.3.5.1 试验基本资料分别给出波浪和水流要素时,应在试验水槽或水池放置建筑物模型前,在研究区域先模拟水流的流速和流向,再模拟无流时的波浪,并进行合成。

3.3.5.2 试验基本资料给出波浪和水流合成要素时,可先进行波、流分离,再模拟要求的水流和波浪。

3.4 试验设备和测量仪器

3.4.1 波浪模型试验水槽的有效段长度应大于10倍波长,水槽宽度宜大于0.5 m。水槽两侧壁与水槽中轴线距离允许偏差应为 $\pm 2\text{mm}$ 。水槽和水池的首尾两端应设消浪装置,且尾部消浪装置应能消除90%以上的反射波,并应采取措施消除或减小造波机二次反射波的影响。有斜向反射时,水池的两侧也应设消浪装置。

3.4.2 波浪模型试验的生波和生流等设备应满足下列要求:

(1)生波设备产生的波形平稳,重复性好;

(2)生流设备产生的水流平稳。

3.4.3 波浪模型试验测量仪器应满足下列要求。

3.4.3.1 置于水中的传感器不应破坏波形和流场。

3.4.3.2 测量系统应满足灵敏度和稳定性的要求,在满量程条件下 2h 内的零漂允许偏差应为 $\pm 5\%$,波高仪线性允许偏差应为 $\pm 2\%$,总力仪、波压仪和波动流速仪的线性允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

3.4.3.3 测波浪力时,测力系统的自振频率不宜小于测力频率的 4~6 倍,不规则波的测力频率宜取高频一侧力谱能量为总能量 30% 处的频率,当不能满足要求时,应按下列公式修正:

$$F = \mu F_i \quad (3.4.3-1)$$

$$\mu = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \left(2\varepsilon \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.4.3-2)$$

式中 F ——修正后的力(N);

F_i ——实测的力(N);

μ ——修正系数;

ω ——作用力的圆频率(rad/s);

ω_0 ——未考虑阻尼时测力系统的自振圆频率(rad/s);

ε ——测力系统阻尼系数(s^{-1})。

3.5 试验数据采集和处理

3.5.1 波浪数据采集和处理应符合下列规定。

3.5.1.1 不规则波试验的波浪数据采集时间间隔应小于有效波周期的 1/10,且不宜大于高频截止频率对应周期的 1/4,在波浪平稳条件下,连续采集的波浪个数不应少于 100 个,多向不规则波不应少于 300 个,并应按附录 A 计算波高和波周期的统计特征值,必要时,可按附录 A 计算波高、波周期的经验频率分布,按附录 B 和附录 C 进行谱分析。

3.5.1.2 规则波试验的波浪数据采集时间间隔应小于平均波周期的 1/20。在波浪稳定条件下,连续采集的波浪个数不应少于 10 个,并取其平均值作为代表值。

3.5.1.3 波高和波周期分析应采用跨零点法,并应设阈值。

3.5.1.4 试验数据处理前,应进行数据可靠性检查,并去除异常值。数据的取值应与仪器测量精度相匹配,并按有效数字运算。

3.5.2 多向不规则波试验的数据测量和处理尚应符合下列规定。

3.5.2.1 应由多个波高仪或流速仪组成阵列,同步测量多点波面或多个波动量变化过程,可采用贝叶斯法分析多向不规则波的方向谱。采用波高仪阵列时,同步测量的波高仪不宜少于4个,波高仪之间的最小距离宜小于谱峰周期对应波长的3/10。

3.5.2.2 多向不规则波平均波向、综合平均波向、方向分布宽度和综合方向分布宽度等参数,可分别按下列公式计算:

$$\theta_m = \arctan \left(\frac{\int_0^{2\pi} G(f, \theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} G(f, \theta) \cos \theta d\theta} \right) \quad (3.5.2-1)$$

$$\bar{\theta} = \arg \left[\int_{f_1}^{f_2} \frac{S(f)}{m_0} \exp(i\theta_m) df \right] \quad (3.5.2-2)$$

$$\sigma_\theta(f) = \left[\int_{\theta_m - \pi}^{\theta_m + \pi} G(f, \theta) (\theta - \theta_m)^2 d\theta \right]^{1/2} \quad (3.5.2-3)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \int_{f_1}^{f_2} \frac{S(f) \sigma_\theta(f)}{m_0} df \quad (3.5.2-4)$$

式中 θ_m ——平均波向(rad);

$G(f, \theta)$ ——方向分布函数(rad^{-1});

f ——频率(Hz);

θ ——波向(rad);

$\bar{\theta}$ ——综合平均波向(rad);

$S(f)$ ——频率谱密度(m^2/Hz);

m_0 ——波浪频率谱的零阶矩(m^2);

f_1, f_2 ——波能分布的频率范围(Hz);

$\sigma_\theta(f)$ ——方向分布宽度(rad);

$\bar{\sigma}_\theta$ ——综合方向分布宽度(rad)。

3.5.2.3 当多向不规则波遇有建筑物反射时,在建筑物前同步

测定的波动量不宜少于 5 个,并将入射波和反射波分离,确定建筑物的反射系数,计算多向入射波和反射波的参数。

3.5.3 波浪爬高和落深数据采集和处理,应在静水位处设阈值,并以静水位为界,按波浪的数据采集和处理方法进行。

3.5.4 作用于建筑物上波浪力的数据采集和处理应符合下列规定。

3.5.4.1 波浪力的数据采集时间间隔应小于波浪数据采集的时间间隔,破波冲击力采集时间间隔应更小,避免漏掉压力峰值,并可根据所测力的最高频率和建筑物频率响应特征选定的截止频率进行滤波处理。

3.5.4.2 不规则波应连续采集 100 个以上波浪所对应的波浪力峰值,并按附录 A 计算波浪力的平均值、1/3、1/10 大值平均值和最大值,必要时,应按附录 B 和附录 C 进行谱和互谱分析。

3.5.4.3 规则波应连续采集 10 个以上波浪所对应的波浪力峰值,取其连续 10 个的平均值作为代表值。破波冲击力,应重复测量多次,累计波浪力个数不宜少于 100 个,除应计算平均值外,尚应按附录 A 计算波浪力的 1/3、1/10 大值平均值和最大值等统计特征值。

3.5.5 波浪作用于建筑物的反射系数可按下列公式计算:

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (3.5.5-1)$$

$$K'_R = \frac{H_R}{H_I} \quad (3.5.5-2)$$

式中 K_R ——不规则波综合反射系数;

E_R ——反射波总能量(J/m²);

E_I ——入射波总能量(J/m²);

K'_R ——规则波反射系数;

H_R ——反射波波高(m);

H_I ——入射波波高(m)。

3.5.6 波浪的透射系数可按下式计算:

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} \quad (3.5.6)$$

式中 K_T ——波浪透射系数;

H_T ——建筑物后的波高(m);

H_I ——入射波波高(m)。

3.5.7 不规则波作用下建筑物的动力响应和港湾共振影响的研究,宜进行波群特性分析,并可采用下列参数表示:

(1)用群高因子表示波群的高度特征:

$$GFH = \frac{\sqrt{2}\sigma_A}{\bar{A}} \quad (3.5.7)$$

式中 GFH ——波群的群高因子,其变化范围为 0~1;

σ_A ——波包线的标准差(m);

\bar{A} ——波包线 $A(t)$ 的均值(m),波包线 $A(t)$ 可采用 Hilbert 变换技术由波面记录算得。

(2)用平均连长表示波群的长度特征。

3.5.8 水流模拟的流速测点布置和数量应按试验条件和要求确定,测点流速的测量应重复 2~3 次,取其平均值作为代表值。

4 整体物理模型试验

4.1 一般规定

4.1.1 波浪传播与变形、港内水域平稳度和船行波,及斜向波、多向波和船行波等对建筑物作用的研究,应采用整体物理模型试验。

4.1.2 整体物理模型试验宜在室内进行。在室外进行时,应避免因风引起的涟波或小波的影响。

4.1.3 整体物理模型试验的范围,应包括试验要求研究的区域和对研究区域波浪要素有影响的水域。

4.1.4 整体物理模型的比尺选择应根据试验水池和建筑物结构的尺度、波浪等动力因素和试验仪器测量精度确定,并应充分利用试验条件,采用较小的模型比尺。

4.1.5 整体物理模型的每组试验应至少重复 3 次,并取其平均值作为代表值。

4.2 边界条件模拟

4.2.1 试验水池中造波机与建筑物模型的间距应大于 6 倍平均波长。模型中设有防波堤堤头时,堤头与水池边界的间距应大于 3 倍平均波长,单突堤堤头与水池边界的距离应大于 5 倍平均波长,并应在水池边界设消浪装置,减小反射影响。进行多向不规则波试验时,研究区域应位于多向波的有效范围内。

4.2.2 整体物理模型的地形可按下列程序制作:

(1)采用不小于 1:5 000 的地形图,按选定的模型比尺划出试验模型的范围,并在图上绘出平面控制导线和网格;

(2)在试验水池中进行控制导线和网格、地形等高线和建筑物

的轮廓线放样,并设置 1~2 个模型水准点;

(3)用等高线控制点法或断面板法控制高程;

(4)模型的地形采用砂等材料充填,压实后,用水泥砂浆抹面。制模断面和控制点高程的允许偏差为 $\pm 1\text{mm}$,抹面后的地形高程允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ 。

4.2.3 波浪等动力因素和边界条件,宜通过工程水域的实测资料进行验证。

4.3 波浪传播与变形模型试验

4.3.1 研究近岸水域的波浪传播变形、航道和建筑物等对波浪传播的影响时,宜进行波浪传播与变形的模型试验。

4.3.2 波浪传播与变形的模型设计除应满足波浪的折射、绕射和反射等相似条件外,尚应考虑底摩阻的影响。

4.3.3 模型应根据试验要求布置测波点。原始入射波测点应设在水深较大、波形平稳处,对重点研究和波浪变化明显的水域应加密测点。测点的间距不应小于 20cm。

4.3.4 试验结果可采用波高或比波高表示。对不规则波,可采用与原始入射波同一累积率的特征波高或特征比波高表示。

4.3.5 采用合成法进行多向波模型试验,可按附录 D 的方法进行。

4.4 港内水域平稳度模型试验

4.4.1 研究波浪对船舶进出港内水域、装卸作业等的影响时,宜进行港内水域平稳度模型试验。

4.4.2 港内水域平稳度模型试验应在港内水域外不受建筑物影响的水域,布置 1~2 个波浪监测点。

4.4.3 港内水域测波点的布置应按第 4.3.3 条的规定执行,并应在每个泊位码头前 1/2 船宽处增设不少于 1 个测波点。试验为规则波且建筑物为直墙式时,增设的测波点应布置在波腹处。

4.4.4 试验结果可采用波高或比波高表示。必要时,应绘制波高

或比波高等值线图。通过船舶运动检测港内水域平稳度时,应测定船舶运动量。

4.4.5 港内水域面积小、形状规则、入射波周期较大时,应考虑长周期波及波群在港内水域引起共振的影响。

4.4.6 研究波浪对取、排水工程的影响时,其模型试验除应按港内水域平稳度模型试验的要求进行外,尚应在取、排水口的头部布置测波点,分析时应考虑长周期波的影响。

4.4.7 采用合成法进行多向波模型试验,可按附录 D 的方法进行。

4.5 船行波模型试验

4.5.1 研究船舶航行形成的波浪及其对护岸等建筑物的作用和对港内水域平稳度的影响时,宜进行船行波模型试验。

4.5.2 船行波模型试验应采用正态模型,模型设计应满足重力相似。试验宜采用拖拽船舶或自航船舶模型产生船行波,其航线与航速与原型相似。研究船行波对护岸建筑物作用时,也可采用造波机产生船行波。

4.5.3 船行波模型试验中测波点的布置,应能测得近船处和近岸处的最大波高和波向。研究船行波对护岸建筑物作用时,应在护岸建筑物的前沿布置测波点。

4.5.4 研究船行波对护岸建筑物的作用时,模拟船行波的作用时间应根据试验要求、船舶通过密度和护岸建筑物的使用要求确定。

4.5.5 研究船行波对港内水域平稳度的影响时,应按试验要求布置测点,重点研究的水域应加密测点。试验结果可采用波高或波高等值线表示。

5 斜坡式和直墙式建筑物断面 物理模型试验

5.1 一般规定

5.1.1 研究波浪对斜坡式、直墙式建筑物的正向作用时,可采用断面物理模型试验。

5.1.2 断面物理模型比尺的选择应根据试验水槽和建筑物结构尺度、波浪等动力因素及试验仪器测量精度确定,并应充分利用试验条件,采用较小的模型比尺。

5.1.3 当水深条件限制,建筑物模型处不能产生要求的波浪要素时,可在建筑物模型前加大地形底坡坡度,加大后的坡度不应陡于1:15。

5.1.4 模型建筑物及其构件的几何尺度允许偏差应为 $\pm 1\%$,且应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内。有重心和质量相似要求的建筑物构件,其重心位置允许偏差应为 $\pm 2\text{mm}$,质量允许偏差应为 $\pm 3\%$ 。单个护面块体、垫层、棱体、基床和护底块石质量允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

5.1.5 斜坡式建筑物护面块体的模拟,当需要检验护面块体的强度时,应模拟护面块体的抗弯强度,其允许偏差应为 $\pm 10\%$ 。

5.1.6 建筑物模型与造波机间的距离应大于6倍平均波长。要求测量建筑物后的波要素时,建筑物模型与试验水槽尾部消波器间的距离应大于2倍平均波长。

5.1.7 斜坡式、直墙式建筑物的稳定性试验宜采用不规则波。模型试验应采取措施排除造波机启动和停止时产生的个别大波的影响。

5.1.8 测量建筑物前的反射波波高时,应在建筑物模型前1倍有

效波长外设置多个波高仪,并根据测得的波面过程进行入射波和反射波分离,分别求出入射波和反射波的能量或波高,按第 3.5.5 条的规定计算反射系数。

5.1.9 断面物理模型的每组试验应至少重复 3 次,并取其平均值作为代表值。

5.2 斜坡式建筑物断面模型试验

5.2.1 斜坡式建筑物护面块体的稳定性试验应满足下列要求。

5.2.1.1 护面块体抛放数量和抛放方式应符合现行行业标准《防波堤设计与施工规范》(JTJ 298)中的有关规定。

5.2.1.2 正式试验前,应用小波连续作用一段时间。

5.2.1.3 模型波浪作用的累计时间,应根据暴风浪的持续时间确定,但模拟的原型波作用时间不宜少于 2h。

5.2.1.4 护面块体的稳定性试验,每组应至少重复 3 次。当 3 次试验的失稳率差别较大时,应增加重复次数。每次试验护面块体均应重新摆放。

5.2.2 斜坡式建筑物护面块体的失稳判别标准应符合下列规定:

(1)在波浪作用下,随机抛放的护面块体累积位移超过单个块体的最大几何尺度时即失稳,强度起控制作用的大型护面块体,其累积位移超过块体最大几何尺度一半时即失稳;

(2)在波浪作用下,单层铺砌的护面块体,其累积位移超过单个块体的厚度时即失稳,单层随机抛放的护面块体,其位移后产生的缝隙宽度超过块体最大几何尺度一半时即失稳;

(3)斜坡式建筑物抛石棱体和块石护底的表面明显变形即失稳。

5.2.3 斜坡式建筑物护面块体失稳率的统计应符合下列规定:

(1)护面块体的失稳率按下式计算:

$$n = \frac{n_d}{N_1} \times 100(\%) \quad (5.2.3)$$

式中 n ——失稳率(%);

n_d ——静水位上、下各 1 倍设计波高范围内护面块体的失稳数；

N_1 ——静水位上、下各 1 倍设计波高范围内的护面块体总数。

(2)斜坡式潜堤稳定性试验,其前、后坡及堤顶护面的失稳率,分别以各自部位的块体总数来计算；

(3)逐级加大波高进行护面块体稳定性试验时,累积计算失稳率。

5.2.4 斜坡式建筑物顶部胸墙稳定性试验,应测量胸墙底和堤顶间摩擦系数。当观测到胸墙发生明显滑动或倾斜时即失稳。

5.2.5 斜坡式建筑物波压力试验测点布置应符合下列规定。

5.2.5.1 测量斜坡式建筑物顶部胸墙波压力分布的测点数视胸墙的尺度和设计要求确定,但胸墙迎浪面及墙底面的测点数均不应少于 3 个。

5.2.5.2 测量斜坡式建筑物坡面上的波压力分布时,应在坡面上布置 1 个测点测量最大波压力,由该测点至坡顶,布置测点不应少于 2 个,由该测点至坡脚,布置测点不应少于 3 个,并应计算各测点上的最大压力分布。

5.3 宽肩台式抛石防波堤断面模型试验

5.3.1 宽肩台式抛石防波堤护面层块石和堤心石应严格挑选。护面层不同级配的块石质量允许偏差应为 $\pm 10\%$ 。

5.3.2 宽肩台式抛石防波堤断面稳定性试验应采用不规则波,并应往复进行不同水位及相应波浪作用下较长时间的试验,确定在设计抛石块质量及不同级配条件下的最终动力稳定断面。

5.3.3 在不同水位及相应波浪作用下,宽肩台式抛石防波堤的堤心石外露时应判定为失稳。

5.3.4 宽肩台式抛石防波堤稳定性的重复试验,应按设计断面重新铺放护面层块石。

5.3.5 宽肩台式抛石防波堤的反射系数与透射系数、波浪爬高和

越浪量,应在最终动力稳定断面形成时进行测定。

5.4 直墙式建筑物断面模型试验

5.4.1 直墙式建筑物的稳定性试验和失稳标准应符合下列规定。

5.4.1.1 进行直墙式建筑物稳定性试验时,应测量直墙底与基床间的摩擦系数。

5.4.1.2 置于抛石基床上的半圆形和大圆筒防波堤,其稳定性试验应与直墙式建筑物相同。

5.4.1.3 直墙式建筑物,当观测到堤身发生明显滑动或倾斜时应判定为失稳。建筑物的基床和护底块石表面明显变形时应判定为失稳。

5.4.2 直墙式建筑物的墙面波压力和底部上托力试验的测点布置应符合下列规定。

5.4.2.1 测量墙面波压力分布时,应在静水位处和墙脚各布置1个测点。静水位至墙顶及静水位至墙脚之间各布置测点不应少于2个。

5.4.2.2 测量墙底部上托力分布时,应在墙底的前、后趾各布置1个测点,前、后趾间布置测点不应少于2个。

5.4.2.3 测量开孔沉箱、大圆筒和半圆形防波堤的波压力分布时,应根据要求加密测点。开孔沉箱箱室、大圆筒防波堤连接处、半圆形防波堤拱圈的内外壁及底板上、下均应布置测点。

5.4.3 测量墙面波压力和墙底部上托力时,根据要求可分别计算下列压力分布:

- (1)总水平力最大时的同步压力分布;
- (2)总垂直力最大时的同步压力分布;
- (3)建筑物滑动稳定安全系数最小时的同步压力分布;
- (4)各测点的最大压力分布。

5.4.4 测量直墙式建筑物墙面上水面壅高的波高仪应靠近墙面。

5.5 越浪量和波浪爬高试验

5.5.1 建筑物越浪量试验宜采用不规则波。可采用称重法测出 1 个波列作用下的总越浪水量,单宽平均越浪量按下式计算:

$$q = \frac{V}{bt} \quad (5.5.1)$$

式中 q ——单宽平均越浪量 [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$];

V ——1 个波列作用下的总越浪水量 (m^3);

b ——收集越浪量的接水宽度 (m);

t ——1 个波列作用的持续时间 (s)。

5.5.2 测量不规则波的单波越浪水量时,应测得建筑物顶部每个波的越浪水量,计算单波的单宽最大越浪水量及其它统计特征值。

5.5.3 采用规则波进行建筑物越浪量试验时,可按工程水域的波高分布分别测得有效波周期时各分级波高作用下建筑物的单宽平均越浪量,且每次分级波高试验累计波浪个数不宜少于 30 个,综合的单宽平均越浪量可按下式计算:

$$q' = \sum_{i=1}^N q(H_i) p(H_i) \Delta H \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5.5.3)$$

式中 q' ——综合的单宽平均越浪量 [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$];

$q(H_i)$ ——波高为 H_i 时测得的单宽平均越浪量 [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$];

$p(H_i)$ ——波高为 H_i 的频率密度 (m^{-1});

H_i ——分级波高 (m);

ΔH ——波高的分级间隔 (m);

N ——波高的分级数, $N \geq 6$ 。

5.5.4 建筑物上的波浪爬高试验宜采用不规则波,并采用电测法测量爬高和落深。采用规则波时,也可目测爬高和落深。

5.5.5 模拟风对越浪量和波浪爬高的影响时,可采用重力相似。模拟的平均风速允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

6 桩基和墩柱建筑物及水下管线 物理模型试验

6.1 一般规定

6.1.1 桩基、墩柱建筑物和水下管线的试验模型,宜采用金属、木材、塑料和混凝土等制作。测力模型部分,宜用轻质、刚劲的材料制作。模型断面尺度的允许偏差应为 $\pm 1\%$,当模型的断面尺度较小时,允许偏差应为 $\pm 1\text{mm}$ 。除模拟弹性相似的桩和管线外,桩和管线模型应具有足够的刚度和平直度。必要时,应模拟桩和管线表面的糙率。

6.1.2 桩和墩柱模型与试验水槽或水池壁的间距不宜小于3倍桩、墩柱模型直径或4倍非圆形桩、墩柱模型宽度在波峰线上的投影,并不应小于15 cm。

6.1.3 桩基、墩柱和水下管线模型试验宜采用不规则波。必要时,应模拟波群、天然波列和方向谱。

6.1.4 波浪与水流共同作用时,桩基、墩柱建筑物和水下管线模型应放置在波浪和水流平稳的区域。

6.2 桩基和墩柱建筑物模型试验

6.2.1 桩基建筑物模型试验应测定桩的正向水平力,必要时,应测定横向水平力,并求出其合力。孤立式桩基建筑物和群桩效应较大的群桩结构,宜测定整段建筑物的受力、倾覆力矩和处于不利位置的桩的受力。

6.2.2 墩柱建筑物模型试验宜测定墩柱的正向水平力、上托力和整个墩柱的倾覆力矩。

6.2.3 测量桩基和墩柱建筑物上波浪力时,可在水槽或水池内,模型同一断面处设置波高仪测量波面;当波高仪与模型不在同一断面时,应对波面与测力值的相位差进行修正。

6.2.4 重力墩式建筑物应对基床护面和护底进行模拟,并观测其稳定性,确定护面和护底块石或块体的稳定质量。

6.2.5 根据要求,桩基、墩柱建筑物模型试验可分别进行下列分析和计算:

(1)按附录 A 计算波要素及波浪力峰值的平均值、1/3、1/10 大值平均值和最大值等统计特征值;

(2)按附录 B 和附录 C 对波要素和波浪力进行谱分析和互谱分析。计算波谱、力谱、波力传递函数、谱的主峰频和谱的零、二阶矩,必要时,计算谱的四阶矩;

(3)按第 3.5.2 条的有关规定计算多向不规则波的方向分布宽度、波力的方向分布宽度及其平均方向;

(4)计算桩和墩柱上波浪力系数。桩、墩柱的惯性力系数和桩的速度力系数按现行行业标准《海港水文规范》(JTJ213)中的公式计算,桩的横向力系数和合力系数按下列公式计算:

$$C_L = \frac{2gF_L}{\gamma D \int_0^{h+\eta_{\max}} u_{\max}^2(z) dz} \quad (6.2.5-1)$$

$$C_R = \frac{2gF_R}{\gamma D \int_0^{h+\eta_{\max}} u_{\max}^2(z) dz} \quad (6.2.5-2)$$

式中 C_L ——横向力系数;

g ——重力加速度(m/s^2);

F_L ——试验中测得桩的横向水平力的 1/10 大峰值平均值(kN);

γ ——水的重度(kN/m^3);

D ——桩的直径(m);

h ——水深(m);

η_{\max} ——1/10 大波的最大波面高度(m);

$u_{\max}(z)$ ——水底面上高度 z (m)处 1/10 大波水质点轨道运动的最大水平速度(m/s);

C_R ——合力系数;

F_R ——试验中测得桩上合力的 1/10 大峰值平均值(kN)。

(5)必要时,按第 3.5.7 条的规定分析不规则波的波群特性。

6.3 带梁板透空建筑物模型试验

6.3.1 带梁板透空建筑物的梁板位于波浪作用范围内时,应按第 6.2 节的有关规定测定梁板下部的桩和墩柱上的波浪力,且应测定梁板上的水平力和上托力分布。也可测定一段建筑物上的总水平力和总上托力。

6.3.2 测定梁板的上托力分布时,应考虑梁板上泄压孔的影响。

6.3.3 测量带梁板透空建筑物对波浪的影响时,测量内容应包括:建筑物前的波浪壅高,建筑物后的 1 倍波长外的透射波高,并计算透射系数;测定建筑物前 1 倍波长外的综合波高,并计算反射系数。必要时,应测定梁板下波面变化情况。

6.3.4 带梁板透空建筑物下部的接岸结构为斜坡时,应按第 5.1 节和第 5.2 节的有关规定模拟斜坡护面,并观测其稳定性。

6.4 水下管线模型试验

6.4.1 水下管线试验模型除应符合第 3.2.3 和第 6.1.1 条的规定外,尚应满足管线两端和底部边界等环境条件与原型相似。

6.4.2 置于槽沟中的管线模型,其槽沟两侧的底床应具有足够宽度。

6.4.3 水下管线模型试验宜测定在波浪、波浪与水流共同作用下管线的水平力及上升力,并观测其稳定性,同步测定管轴线上方的波面过程。

7 浮式建筑物物理模型试验

7.1 一般规定

7.1.1 浮式建筑物模型的几何尺度允许偏差应为 $\pm 1\%$,且应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内;重心位置允许偏差应为 $\pm 2\text{mm}$;质量允许偏差应为 $\pm 2\%$ 。

7.1.2 浮式建筑物整体模型与试验水池壁的间距不宜小于3倍圆形浮式建筑物模型的直径或4倍非圆形浮式建筑物模型长度在波峰线上的投影,且不宜小于5倍平均波长。当不能满足间距要求时,应对水池壁进行消浪处理。

7.1.3 浮式建筑物模型试验宜采用不规则波。必要时,应考虑风、波群和二阶长波的影响。

7.1.4 测量线位移和角位移的仪器,应放置在浮式建筑物重心处,测角位移的仪器转动轴应与浮式建筑物的转动轴平行,并应减小或避免测量仪器对浮式建筑物运动的影响。

7.1.5 测量锚链和缆绳拉力的仪器宜放在靠近浮式建筑物的一端。系缆点的位置应与原型相对应。

7.2 浮式防波堤模型试验

7.2.1 浮式防波堤模型试验,宜测定防波堤在波浪、波浪与水流和波浪与风作用下的波浪反射系数、透射系数和防波堤的横摇、纵摇、垂荡等运动量及锚链拉力、缆绳拉力和锚碇力等。

7.2.2 柔性浮式防波堤的消浪浮体模型应考虑浮体的弹性和表面糙率的影响。

7.2.3 模型锚链应设计成环扣,只承受轴向拉力。模型锚链的初

拉力应与原型相似。

7.2.4 模型锚链弹性的模拟可按下列公式计算：

$$\Delta L_m = \frac{T_m L'_m}{(EA)_m} \quad (7.2.4-1)$$

$$(EA)_m = \frac{(EA)_p}{\lambda^3} \quad (7.2.4-2)$$

$$(EA)_p = \frac{1}{2} E_p \pi d_p^2 \quad (7.2.4-3)$$

式中 ΔL_m ——模型锚链伸长(m)；

T_m ——模型锚链拉力(N)；

L'_m ——模型锚链长度(m)；

$(EA)_m$ ——模型锚链的抗拉刚度(N)；

$(EA)_p$ ——原型锚链的抗拉刚度(N)；

λ ——模型长度比尺；

E_p ——原型锚链的有效弹性模量(Pa)；

d_p ——原型链环杆的直径(m)。

7.2.5 计算浮式防波堤的波浪透射系数时,透射波波高应为防波堤后 1 倍波长外波浪平稳处的波高。

7.2.6 采用不规则波进行试验时,每组试验应重复 3~5 次。根据要求,可进行防波堤运动量和锚链拉力等统计特征值和谱分析。

7.2.7 采用规则波进行试验时,试验应重复多次,累计波浪个数不宜少于 100 个。根据要求,可进行防波堤的运动量和锚链力的平均值、1/3 大值平均值和最大值等特征值的计算。

7.3 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型试验

7.3.1 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型试验,宜测定系泊船舶在波浪、波浪与水流和波浪与风作用下,船舶的横摇、纵摇、首摇、横荡、纵荡、垂荡等运动量和缆绳拉力、撞击力等。根据要求,可测定船舶对码头的挤靠能量。

7.3.2 船舶模型对码头挤靠点的个数和护舷位置应与原型相对

应。

7.3.3 船舶模型系缆点个数、缆绳根数、缆绳弹性、缆绳质量、缆绳长度和缆绳初拉力等系缆条件均应与原型相似。

7.3.4 船舶模型的缆绳弹性模量宜按原型缆绳实测值模拟。当无实测值时,模型缆绳拉力可按下式计算:

$$T_m = \frac{C_p d_p^2 (\Delta S/S)^n}{\lambda^3} \quad (7.3.4)$$

式中 T_m ——模型缆绳拉力(N);

C_p ——原型缆绳弹性系数,无实测值时,钢缆可取 $C_p = 26.97 \times 10^4 \text{MPa}$,尼龙缆可取 $C_p = 1.540 \times 10^4 \text{MPa}$;

d_p ——原型缆绳直径(m);

$\Delta S/S$ ——原型缆绳相对伸长;

n ——指数,钢缆可取 $n = 1.5$,尼龙缆可取 $n = 3$;

λ ——模型长度比尺。

7.3.5 模型缆绳质量可按下式计算:

$$W = \frac{C_p d_p^2}{\lambda^2} \quad (7.3.5)$$

式中 W ——模型缆绳单位长度质量(kg/m);

C_p ——空气中原型缆绳质量比例系数,钢缆可取 $C_p = 3670$ [kg/(m²·m)],尼龙缆可取 $C_p = 670$ [kg/(m²·m)];

d_p ——原型缆绳直径(m);

λ ——模型长度比尺。

7.3.6 系泊船舶运动量、系缆力和船舶对码头撞击力的试验,应符合第 7.2.6 和 7.2.7 条的规定。

8 波浪泥沙物理模型试验

8.1 一般规定

8.1.1 波浪作用下的岸滩演变和建筑物附近底床局部冲刷等的研究,宜进行波浪泥沙模型试验。

8.1.2 波浪泥沙模型试验宜采用正态模型。当受试验条件的限制需采用变态模型时,模型的变率不宜过大,并应对变态模型试验的结果进行论证。

8.1.3 波浪泥沙模型试验的模型设计,应满足波浪运动条件相似和泥沙运动条件相似。当相似条件不能同时满足时,应通过论证选择其中的主要相似条件进行模拟。

8.1.4 波浪泥沙模型试验的模型沙可选用天然沙或轻质沙,但应满足泥沙运动条件和冲淤相似。

8.1.5 波浪泥沙模型试验,应收集工程水域的波浪和泥沙等资料,对试验模型相似性进行验证。

8.1.6 波浪泥沙模型试验应至少进行2次。

8.1.7 波浪泥沙模型试验,应符合现行行业标准《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》(JTJ/T233)的有关规定。

8.2 沿岸输沙的波浪泥沙模型试验

8.2.1 波浪作用下的沿岸泥沙输移和港口、航道回淤等的研究,宜采用整体物理模型。

8.2.2 沿岸输沙的波浪泥沙模型试验宜采用不规则波。采用规则波时,应选取代表波浪,其波要素可按下列公式计算:

$$H_* = \left(\frac{\sum H_i^2 p_i}{\sum p_i} \right)^{1/2} \quad (8.2.2-1)$$

$$\alpha_* = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[\frac{\sum H_i^2 p_i \sin 2\alpha_i}{\sum H_i^2 p_i} \right] \quad (8.2.2-2)$$

式中 H_* ——代表波高(m);

H_i ——测站资料大于泥沙起动波高的量级为 i 的有效波高(m),泥沙起动波高可按现行行业标准《海港水文规范》(JTJ213)的附录 P 计算;

p_i ——测站资料对应为 i 量级的波高及波向的出现频率;

α_* ——代表波向(rad);

α_i ——测站资料对应为 i 量级波浪的波向角(rad)。

代表波周期可选为代表波高相对应的周期。

8.2.3 当有两个相反方向的沿岸输沙时,应以岸线的垂线为界划分成两个区,分别确定两个方向的代表波浪。

8.2.4 沿岸输沙波浪模型试验的比尺选择、边界条件的确定、验证试验和成果分析应按现行行业标准《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》(JTJ/T233)的有关规定执行。

8.3 岸滩横剖面的波浪泥沙模型试验

8.3.1 岸滩横剖面的波浪泥沙模型试验宜采用不规则波。采用规则波时,应取有效波高和平均波周期为代表波要素。

8.3.2 岸滩横剖面模型的泥沙运动条件相似比尺应满足下列要求。

8.3.2.1 满足泥沙起动相似的泥沙粒径比尺宜通过波浪水槽试验确定,当采用泥沙起动波高相似时,可按式计算:

$$\lambda_{d_{50}} = \frac{1}{\lambda_h} \lambda \left(\frac{\rho_a - \rho}{\rho} g d_{50} + \frac{0.486}{d_{50}} \right)^{3/2} \quad (8.3.2-1)$$

式中 $\lambda_{d_{50}}$ ——泥沙粒径比尺;

λ_h ——模型垂直长度比尺;

$\lambda \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50} + \frac{0.486}{d_{50}} \right)^{3/2}$ ——原型与模型的 $\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50} + \frac{0.486}{d_{50}} \right)^{3/2}$ 之比;

ρ_s, ρ ——分别为泥沙和水的密度 (g/cm^3);

g ——重力加速度 (cm/s^2);

d_{50} ——泥沙的中值粒径 (cm)。

8.3.2.2 满足泥沙冲淤相似的沉降速度比尺可按下式计算:

$$\lambda_{\omega_s} = \frac{1}{\lambda_1} \lambda_h^{3/2} \quad (8.3.2-2)$$

式中 λ_{ω_s} ——泥沙的沉降速度比尺;

λ_1 ——模型水平长度比尺;

λ_h ——模型垂直长度比尺。

8.3.2.3 满足泥沙沉降规律的沉降速度比尺可按下式计算:

$$\lambda_{\omega_s} = \lambda_{d_{50}}^2 \lambda \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \quad (8.3.2-3)$$

式中 λ_{ω_s} ——泥沙的沉降速度比尺;

$\lambda_{d_{50}}$ ——泥沙的粒径比尺;

$\lambda \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)$ ——泥沙和水的相对密度比尺。

8.3.2.4 冲淤时间比尺可按下式计算:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_1^2 \lambda_h}{\lambda_{Q_T}} \quad (8.3.2-4)$$

式中 λ_t ——冲淤时间比尺;

λ_{γ_0} ——泥沙干重度比尺;

λ_1, λ_h ——分别为模型水平长度比尺和垂直长度比尺;

λ_{Q_T} ——输沙量比尺,宜通过原型和模型实测输沙量确定。

8.3.3 岸滩横剖面试验模型固定底床上模型沙的铺设厚度,除应大于预测冲刷最大深度外,尚应考虑水体对岸滩渗透的影响。

8.3.4 试验宜在造波机二次反射影响较小的水槽内进行,并应监测原始入射波。

8.3.5 试验可在生波后的 15、30 和 60 min 测量岸滩横剖面变化, 其后应每小时测量 1 次。当前、后两次岸滩横剖面的测量结果无明显变化时, 可确定为岸滩最终动力稳定剖面。

8.3.6 岸滩横剖面稳定试验应分别进行平常波浪和暴风浪作用下的试验。

8.4 建筑物附近底床局部冲刷模型试验

8.4.1 波浪作用下建筑物附近底床局部冲刷模型试验主要应包括冲刷坑的位置与形状、稳定冲刷深度和冲刷随时间的变化过程等内容。

8.4.2 建筑物附近底床局部冲刷模型试验宜采用不规则波。采用规则波时, 应取有效波高和平均波周期为代表波要素。

8.4.3 建筑物附近底床局部冲刷试验的模型设计, 除应满足建筑物几何相似和波浪运动条件相似外, 尚应满足泥沙运动条件和冲刷形态、尺度相似, 并可按下式确定:

$$\left(\frac{u_b - u_0}{\omega_s} \right)_m = \left(\frac{u_b - u_0}{\omega_s} \right)_p \quad (8.4.3)$$

式中 u_b ——浅水波底部水质点轨道运动速度(m/s);

u_0 ——泥沙起动流速(m/s);

ω_s ——泥沙的静水沉降速度(m/s)。

脚标 m、p 分别代表模型和原型值。

8.4.4 当模型试验采用天然沙, 泥沙起动流速相对于浅水波底部水质点轨道运动速度较小、且可以忽略不计时, 模型沙粒径比尺可按下式近似计算:

$$\lambda_{d_{50}} = \begin{cases} \lambda^{1/4}, & \text{当 } d_{50} < 0.1\text{mm 时} \\ \lambda^{1/2}, & \text{当 } 0.1\text{mm} \leq d_{50} < 2.5\text{mm 时} \end{cases} \quad (8.4.4)$$

式中 $\lambda_{d_{50}}$ ——泥沙粒径比尺;

λ ——模型长度比尺;

d_{50} ——泥沙中值粒径(mm)。

8.4.5 试验宜在造波机二次反射影响较小的水槽或水池中进行,并应监测原始入射波。

8.4.6 试验可在生波后的 15min、30min 和 60min 测量底床冲刷剖面变化,其后应每小时测量 1 次,当前、后两次底床剖面的测量结果无明显变化时,可确定为最终冲刷剖面。

8.4.7 建筑物附近底床有抛石或沉排等护底时,应同时观测护底因底床局部冲刷引起的变化。

8.4.8 桩基、墩柱建筑物等附近底床冲刷坑形状为三维时,试验水槽或水池两侧边壁与预测冲刷坑边缘应留有足够的距离。

9 波浪数值模拟

9.1 一般规定

9.1.1 波浪数值模拟应根据工程区域的水下地形、计算水域范围、建筑物特征、工程特点和要求,选用适宜的数学模型。波浪数值模拟可采用多种数学模型嵌套使用。

9.1.2 波浪数值模拟的范围应包括对工程区域波要素有影响的水域。

9.1.3 波浪数值模拟应根据入射波况和模拟水域特点确定边界条件。当进行非定常数值模拟时,尚应确定初始条件。

9.1.4 波浪数值模拟采用的数值计算方法应满足稳定性、收敛性和精度的要求。

9.1.5 波浪数值模拟的网格划分,应能满足正确模拟计算水域的水下地形、建筑物和波要素等特征的要求。

9.1.6 波浪数值模拟的可靠性应采用理论解、现场实测资料或试验资料进行验证。

9.2 风浪数值模拟

9.2.1 研究开敞水域波浪传播的外边界条件和局部水域的风浪分布,宜进行风浪数值模拟。

9.2.2 风浪数学模型应能模拟在风场作用下波浪的成长、传播变形和衰减的过程。必要时,应计入水流对波浪的影响。

9.2.3 风浪数值模拟可采用波浪能量平衡方程或波作用守恒方程为基本方程,选用有限差分法或其它合适的数值方法求解。基本方程源函数项的确定应符合下列规定。

9.2.3.1 基本方程的源函数项应包括风能输入、底摩阻和波浪破碎后的能量损耗。必要时,应计入波与波相互作用项或波与水流相互作用项。源函数项宜通过现场资料验证确定,也可通过理论解或经验公式计算。

9.2.3.2 源函数风能输入项中风速的确定,可根据实测或地面天气图上的气压数据按梯度风公式计算,再换算成水面上 10m 高处的风速。对较规则的气压场,可采用合适的气压场模型计算,计算风场的范围应包括对工程区域波要素有影响的水域,并宜采用现场实测风速资料验证计算结果。

9.2.4 风浪数值模拟的开边界宜取在风场的外围,其波高可取为零或根据边界外的风场确定该处的波要素。

9.2.5 对非定常风场,应自计算点明显受到风浪影响时开始模拟,至风浪影响很小时结束。

9.3 开敞水域波浪传播数值模拟

9.3.1 研究波浪由特定水深向近岸或工程区传播中的浅水效应、折射、绕射、反射、底摩阻、波浪破碎、波浪非线性及流与波、风与波、波与波的相互作用等引起的变形时,应进行开敞水域波浪传播数值模拟。

9.3.2 开敞水域波浪传播数值模拟应根据要求和工程特点,选用下列波浪传播数学模型。

9.3.2.1 水下地形的底坡坡度缓于 1:3 时,可采用缓坡方程数学模型。

9.3.2.2 近岸波浪非线性影响较大时,根据不同相对水深可采用 Boussinesq 型方程的数学模型。

9.3.2.3 大水域波浪场的模拟可采用缓坡方程的抛物型近似模型。模型中应计入底摩阻和波浪破碎的影响。必要时,尚应计入较大的波浪传播角、波浪非线性和局部风成波的影响。

9.3.2.4 水下地形等深线较为平直且水域内无障碍物时,可采用附录 E 的波浪折射数学模型。

9.3.3 对工程起控制作用的计算点处的波要素,应根据该点及其附近点的波要素计算值综合确定。

9.4 港内水域波浪传播数值模拟

9.4.1 研究港内水域的波折射和绕射等的变形时,应进行港内水域波浪传播数值模拟。

9.4.2 港内水域波浪传播数值模拟应根据要求和工程特点,选用能反映引起波浪变形主要因素的港内水域波浪传播数学模型。

9.4.3 港内水域波浪传播数值模拟可采用缓坡方程或 Boussinesq 型方程数学模型。根据实际情况,也可用两种模型的简化形式。港内水域水深较均匀时,可采用附录 F 的方法求解。

9.4.4 用港内水域波浪传播数学模型模拟港内水域的波要素时,应建立港口内、外水域联立求解的数学模型。当口门附近的反射波对港内水域工程区域的波影响较小时,可将口门处的波浪作为入射条件,港内水域作为求解域。

9.4.5 模拟大型港内水域的波要素时,应计入底摩阻影响。必要时,应计入局部风成波的影响。

9.4.6 模拟港外航道至口门处的波要素时,应采用同时反映波浪折射和绕射的数学模型。并应计入港内航道对波浪场的影响。

9.4.7 港内水域波浪数值模拟的边界条件,可根据建筑物对波浪的反射情况按全反射、部分反射或全透射边界处理。

9.5 波浪力数值模拟

9.5.1 作用于结构物表面的波浪力宜进行三维数值模拟。当结构物与波向垂直,其长度与波长之比不小于 1.0、且沿该长度方向上结构物断面形状不变时,可按二维断面进行波浪力数值模拟。

9.5.2 作用于结构物表面的波浪力,当圆形结构物的直径或非圆形结构物的宽度在波峰线上投影与波长之比大于 0.2 时,可采用势流方程求解。

9.5.3 结构物的刚度较小时,应计入波浪和结构物动力响应的耦

合作用。

9.5.4 多个结构物并存,其间距与波长之比或间距与结构物的平面尺度之比较小时,应计入结构物间的相互影响。

9.5.5 采用数值波浪水槽或水池进行波浪力数值模拟时,应对数值波浪水槽或水池和波浪力模拟结果进行验证。

附录 A 不规则波试验数据统计分析

A.0.1 波浪模型试验中,采集的波高、波周期、波浪力、波浪爬高等不规则波试验数据的统计特征值,应分别按下列公式计算:

将采集到的试验数据从大到小排列成 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ 序列, N 为数据样本总数。试验数据的统计特征值分别为:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{A.0.1-1})$$

$$x_{1/3} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} x_i \quad (\text{A.0.1-2})$$

$$x_{1/10} = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^{N/10} x_i \quad (\text{A.0.1-3})$$

$$x_{1/100} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^{N/100} x_i \quad (\text{A.0.1-4})$$

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (\text{A.0.1-5})$$

$$m_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^n, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{A.0.1-6})$$

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^n, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{A.0.1-7})$$

$$\sigma_x = \mu_2^{1/2} \quad (\text{A.0.1-8})$$

$$C_v = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \quad (\text{A.0.1-9})$$

$$C_s = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} \quad (\text{A.0.1-10})$$

$$C_e = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 \quad (\text{A.0.1-11})$$

式中 \bar{x} ——平均值;

$x_{1/3}$ —— $\frac{1}{3}$ 大值平均值;
 $x_{1/10}$ —— $\frac{1}{10}$ 大值平均值;
 $x_{1/100}$ —— $\frac{1}{100}$ 大值平均值;
 x_{rms} ——均方根值;
 m_n —— n 阶原点矩;
 μ_n —— n 阶中心矩;
 σ_x ——均方差;
 C_v ——离差系数;
 C_s ——偏态系数;
 C_e ——峰度系数。

A.0.2 波高、波周期、波浪力、波浪爬高和越浪量等不规则波试验数据的经验分布应按下列方法计算。

(1)对任一随机数据序列的一元经验分布按下列公式计算:

对总数为 N 的数据序列 x_i 以间隔 Δx 划分区间,且总区间数 J 不少于 10 个。则有

$$p_j = \frac{n_j}{N}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (\text{A.0.2-1})$$

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^j n_i}{N} \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (\text{A.0.2-2})$$

$$f_j = \frac{p_j}{\Delta x} \quad (\text{A.0.2-3})$$

式中 p_j ——频率;

n_j —— x_i 落入第 j 区间的个数;

P_j ——累积频率;

f_j ——频率密度。

(2)对任意两个随机数据序列的二元经验分布按下列公式计算:

对总数分别为 N 的两个随机数据序列 x_i 和 y_i 以间隔 Δx 和 Δy 划分区间, 则有

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N} \quad (\text{A.0.2-4})$$

$$f(i, j) = \frac{p_{ij}}{\Delta x \Delta y} \quad (\text{A.0.2-5})$$

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^L p_{ij}}{\Delta x} \quad (\text{A.0.2-6})$$

$$f_j = \frac{\sum_{i=1}^M p_{ij}}{\Delta y} \quad (\text{A.0.2-7})$$

$$f(j|i) = \frac{f(i, j)}{f_i} \quad (\text{A.0.2-8})$$

$$f(i|j) = \frac{f(i, j)}{f_j} \quad (\text{A.0.2-9})$$

$$\left. \begin{aligned} P(1, 1) &= \Delta x \Delta y f(1, 1), \quad i = 1, j = 1 \\ P(i, 1) &= P(i-1, 1) + \Delta x \Delta y f(i, 1), \quad i \geq 2, j = 1 \\ P(1, j) &= P(1, j-1) + \Delta x \Delta y f(1, j), \quad i = 1, j \geq 2 \\ P(i, j) &= P(i-1, j) + P(i, j-1) - P(i-1, j-1) + \\ &\quad \Delta x \Delta y f(i, j), \quad i \geq 2, j \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.0.2-10})$$

式中

p_{ij} ——频率;

n_{ij} —— x_i, y_i 同时落入第 (i, j) 区间的个数, M, L 分别为 x_i, y_i 的划分区间总数;

$f(i, j)$ ——频率密度;

f_i, f_j ——边际频率密度;

$f(j|i), f(i|j)$ ——条件频率密度;

$P(i, j)$ ——累积频率。

A.0.3 随机数据序列 x_i, y_i 的相关系数应按下式计算:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{A.0.3})$$

式中 ρ ——相关系数；

N —— x_i, y_i 的样本总数；

\bar{x}, \bar{y} —— x_i, y_i 的平均值。

A.0.4 当需要对随机数据序列 x_i 和 y_i 标准化后再进行统计分析时,可按下式标准化:

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (\text{A.0.4-1})$$

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (\text{A.0.4-2})$$

式中 x'_i, y'_i —— x_i, y_i 标准化后的值；

\bar{x}, \bar{y} —— x_i, y_i 的平均值；

σ_x, σ_y —— x_i, y_i 的均方差。

附录 B 随机数据时间序列的谱分析

B.0.1 波浪模型试验中,采集的波高、波浪力等随机数据时间序列 $x(t)$,可按下列方法进行谱分析。

B.0.1.1 相关函数法进行谱分析可按下列步骤进行:

(1)对随机数据时间序列中心化;

(2)按下式计算相关函数:

$$R(\nu\Delta t) = \frac{1}{N - \nu} \sum_{n=1}^{N-\nu} x(t_n)x(t_n + \nu\Delta t) \quad (\text{B.0.1-1})$$

式中 $R(\nu\Delta t)$ ——相关函数;

ν ——滞后数, $\nu = 0, 1, 2, \dots, m$;

m ——最大滞后数, $m = \frac{N}{15 \sim 20}$;

N ——样本总数, $N = \frac{T}{\Delta t}$;

T ——总的采样时间;

Δt ——采样时间间隔, $t_n = n\Delta t, n = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

(3)按下式计算粗谱值:

$$\hat{S}(\omega_k) = \frac{2\Delta t}{\pi} \left[\frac{1}{2} R(0) + \sum_{\nu=1}^{m-1} R(\nu\Delta t) \cos\left(\frac{\pi k \nu}{m}\right) + \frac{1}{2} R(m\Delta t) \cos(\pi k) \right]$$
$$k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (\text{B.0.1-2})$$

式中 $\hat{S}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率, $\omega_k = \frac{\pi k}{m\Delta t}$;

ν ——滞后数, $\nu = 0, 1, 2, \dots, m$;

m ——最大滞后数;

Δt ——采样时间间隔。

(4)对粗谱进行平滑,当采用 Hanning 或 Hamming 窗平滑时,

则有:

$$\underline{S}(\omega_k) = \alpha \hat{S}_{k+1} + (1 - 2\alpha) \hat{S}_k + \alpha \hat{S}_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (\text{B.0.1-3})$$

$$\underline{S}(\omega_0) = (1 - 2\alpha) \hat{S}_0 + 2\alpha \hat{S}_1 \quad (\text{B.0.1-4})$$

$$\underline{S}(\omega_m) = 2\alpha \hat{S}_{m-1} + (1 - 2\alpha) \hat{S}_m \quad (\text{B.0.1-5})$$

式中 $\underline{S}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的平滑后的谱密度;

\hat{S}_k ——对应 ω_k 的粗谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率;

ω_0, ω_m ——分别为起始和最后两端点的圆频率;

α ——Hanning 和 Hamming 窗系数, 分别为 0.25 和 0.23。

(5)按下式计算谱的置信区间:

$$P\left\{\frac{K}{b}\underline{S}(\omega) \leq S(\omega) \leq \frac{K}{a}\underline{S}(\omega)\right\} = \beta \quad (\text{B.0.1-6})$$

式中 $P\{ \mid$ ——估计的谱密度值落入所给区间的概率;

K ——自由度, $K = 2\left(\frac{N}{m} - \frac{1}{4}\right)$;

N ——样本总数;

m ——最大滞后数;

a, b ——按 χ^2 分布求出的两个正整数, 并满足:

$$P\{\chi^2(K) \geq b\} = \frac{1-\beta}{2}$$

$$P\{\chi^2(K) \geq a\} = \frac{1+\beta}{2}$$

β ——给定的置信水平。

B.0.1.2 快速 Fourier 变换(FFT)法进行谱分析可按下列步骤进行:

(1)截断数据时间序列或增加零,使每个序列有 $N = 2^n$ 数据, n 为正整数;

(2)对数据时间序列中心化,并用余弦坡度函数法等削尖数据时间序列;

(3)调用 FFT 子程序,按下式计算削尖后的数据时间序列 x_j 的 Fourier 变换:

$$X_k = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i \frac{2\pi j k}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \quad (\text{B.0.1-7})$$

式中 N ——样本总数;

Δt ——采样时间间隔。

(4)按下式计算粗谱:

$$\hat{S}(\omega_k) = \frac{1}{2\pi N \Delta t} X_k^* X_k \quad (\text{B.0.1-8})$$

式中 $\hat{S}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率, $\omega_k = \frac{2\pi k}{N \Delta t}$;

N ——样本总数;

Δt ——采样时间间隔;

X_k^* —— X_k 的共轭复数。

(5)对粗谱进行修正:

$$\tilde{S}(\omega_k) = \hat{S}(\omega_k) \frac{N}{\sum_{n=0}^N b^2(n)} \quad (\text{B.0.1-9})$$

式中 $\tilde{S}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的修正后的谱密度;

$\hat{S}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率;

N ——样本总数;

$b(n)$ ——修正函数,采用余弦坡度函数法削尖数据时间序列时,有:

$$b(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{n\pi}{l} \right), & 0 \leq n < l \\ 1, & l \leq n \leq N - l \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos \frac{(N - n)\pi}{l} \right], & N - l < n \leq N \end{cases}$$

$$l \approx 0.1N。$$

(6)对修正后的粗谱进行平滑,当采用矩形窗平滑时,则有:

$$\underline{S}(\omega_k) = \frac{1}{2p+1} \sum_{i=-p}^p \tilde{S}(\omega_{k+i}), \text{ 取 } p = \frac{N}{80} \sim \frac{N}{160} \quad (\text{B.0.1-10})$$

式中 $\underline{S}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 平滑后的谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率;

$\tilde{S}(\omega_{k+i})$ ——对应 ω_{k+i} 修正后的粗谱密度;

N ——样本总数。

(7)按 χ^2 分布计算谱的置信区间,此时的自由度 $K \approx 4p$ 。

B.0.2 谱矩及相应参数可按下列公式计算:

$$m_r = \int_0^\infty \omega^r S(\omega) d\omega \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$\omega_{pq} = \left(\frac{m_p}{m_q} \right)^{\frac{1}{p-q}}, p = 2, 1, 0; q = 0, 1, 2 \quad (\text{B.0.2-2})$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty \omega S^2(\omega) d\omega \quad (\text{B.0.2-3})$$

式中 m_r ——谱的 r 阶矩, $r = 0, 1, 2, 3, 4$;

ω ——圆频率;

$S(\omega)$ ——频率谱密度;

ω_{pq} ——由谱的 p 阶和 q 阶矩组合的圆频率;

m_p, m_q ——谱的 p 阶矩和 q 阶矩;

Q_p ——谱尖度。

附录 C 随机数据时间序列的互谱分析

C.0.1 研究任意两个随机数据时间序列对应的相互关系时,可计算互相关函数、互谱及传递函数。

C.0.2 经中心化后任意两个随机数据时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数可按下列公式计算:

$$\hat{R}_{xy}(\nu\Delta t) = \frac{1}{N-\nu} \sum_{n=1}^{N-\nu} x(t_n) y(t_n + \nu\Delta t) \quad (\text{C.0.2-1})$$

$$\hat{R}_{yx}(\nu\Delta t) = \frac{1}{N-\nu} \sum_{n=1}^{N-\nu} x(t_n + \nu\Delta t) y(t_n) \quad (\text{C.0.2-2})$$

式中 $R_{xy}(\nu\Delta t), R_{yx}(\nu\Delta t)$ ——互相关函数;

ν ——滞后数, $\nu = 0, 1, 2, \dots, m$;

m ——最大滞后数, $m = \frac{N}{15 \sim 20}$;

N ——样本总个数, $N = \frac{T}{\Delta t}$;

T ——总的采样时间;

Δt ——采样时间间隔, $t_n = n\Delta t, n = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

C.0.3 任意两个随机数据时间序列的互谱分析可按下列方法进行。

C.0.3.1 相关函数法进行互谱分析可按下列步骤进行:

(1)按式(C.0.2-1)和式(C.0.2-2)式计算任意两个随机数据时间序列的互相关函数;

(2)令

$$\hat{A}_{xy}(\nu\Delta t) = \frac{1}{2} [\hat{R}_{xy}(\nu\Delta t) + \hat{R}_{yx}(\nu\Delta t)] \quad (\text{C.0.3-1})$$

$$\hat{B}_{xy}(\nu\Delta t) = \frac{1}{2} [\hat{R}_{xy}(\nu\Delta t) - \hat{R}_{yx}(\nu\Delta t)] \quad (\text{C.0.3-2})$$

并按下列公式分别计算粗同相谱、粗异相谱和粗互谱:

$$\hat{C}_{xy}(\omega_k) = \frac{2\Delta t}{\pi} \left[\hat{A}_{xy}(0) + 2 \sum_{\nu=1}^{m-1} \hat{A}_{xy}(\nu\Delta t) \cos\left(\frac{\pi\nu k}{m}\right) + (-1)^k \hat{A}_{xy}(m\Delta t) \right],$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (\text{C.0.3-3})$$

$$\hat{Q}_{xy}(\omega_k) = \frac{4\Delta t}{\pi} \sum_{\nu=1}^{m-1} \hat{B}_{xy}(\nu\Delta t) \sin\left(\frac{\pi\nu k}{m}\right) \quad (\text{C.0.3-4})$$

$$\hat{S}_{xy}(\omega_k) = \hat{C}_{xy}(\omega_k) - i\hat{Q}_{xy}(\omega_k) \quad (\text{C.0.3-5})$$

式中 $R_{xy}(\nu\Delta t), R_{yx}(\nu\Delta t)$ ——互相关函数;

$\hat{C}_{xy}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗同相谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率, $\omega_k = \frac{\pi k}{m\Delta t}$;

ν ——滞后数, $\nu = 0, 1, 2, \dots, m$;

m ——最大滞后数;

Δt ——采样时间间隔;

$\hat{Q}_{xy}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗异相谱密度;

$\hat{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗互谱密度。

(3)对粗谱进行平滑,当采用 Hanning 或 Hamming 窗平滑时,则有

$$\underline{S}_{xy}(\omega_k) = \alpha \hat{S}_{xy}(\omega_{k+1}) + (1 - 2\alpha) \hat{S}_{xy}(\omega_k) + \alpha \hat{S}_{xy}(\omega_{k-1}),$$

$$k = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (\text{C.0.3-6})$$

$$\underline{S}_{xy}(\omega_0) = (1 - 2\alpha) \hat{S}_{xy}(\omega_0) + 2\alpha \hat{S}_{xy}(\omega_1) \quad (\text{C.0.3-7})$$

$$\underline{S}_{xy}(\omega_m) = 2\alpha \hat{S}_{xy}(\omega_{m-1}) + (1 - 2\alpha) \hat{S}_{xy}(\omega_m) \quad (\text{C.0.3-8})$$

$\underline{S}_{yx}(\omega_k), \underline{S}_{yx}(\omega_0)$ 和 $\underline{S}_{yx}(\omega_m)$ 亦按上述相同步骤计算。

式中 $\underline{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的平滑后的互谱密度;

$\hat{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗互谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率;

ω_0, ω_m ——分别为起始和最后两端点的圆频率;

m ——最大滞后数;

α ——Hanning 和 Hamming 窗系数,分别为 0.25 和 0.23。

C.0.3.2 FFT 法进行互谱分析应按下列步骤进行:

(1)截断两随机数据时间序列或增加零,使每个序列具有 $N = 2^n$ 个数据, n 为正整数;

(2)对数据时间序列中心化,并用余弦坡度函数法等削尖两个随机数据时间序列;

(3)把削尖后的随机数据时间序列 x_j 和 y_j 分别贮存在 $z_j = x_j + iy_j$ 的实部和虚部中, $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$;

(4)调用 FFT 子程序,按下列公式分别计算 Z_k , 以及 x_j 和 y_j 的 Fourier 变换:

$$Z_k = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} z_j e^{-i \frac{2\pi j k}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (\text{C.0.3-9})$$

$$X_k = \frac{Z_k + Z_{N-k}^*}{2} \quad (\text{C.0.3-10})$$

$$Y_k = \frac{Z_k - Z_{N-k}^*}{2} \quad (\text{C.0.3-11})$$

式中 Δt ——采样时间间隔;

N ——样本总数;

Z_{N-k}^* —— Z_{N-k} 的共轭复数。

(5)粗互谱按下式计算:

$$\hat{S}_{xy}(\omega_k) = \frac{1}{2\pi N \Delta t} X_k^* Y_k \quad (\text{C.0.3-12})$$

式中 $\hat{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应 ω_k 的粗互谱密度;

ω_k ——对应 k 的圆频率, $\omega_k = \frac{2\pi k}{N \Delta t}$;

N ——样本总数;

Δt ——采样时间间隔;

X_k^* —— X_k 的共轭复数。

(6)按附录 B 第 B.0.1 条有关规定的对粗谱进行修正和平滑。

C.0.4 传递函数可按下式计算：

设两个随机数据时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为线性系统的输入、输出函数，则传递函数为：

$$T_{xy}(\omega) = \frac{\underline{S}_{xy}(\omega)}{\underline{S}_{xx}(\omega)} \quad (\text{C.0.4})$$

式中 $T_{xy}(\omega)$ ——由 $x(t)$ 到 $y(t)$ 的传递函数；

ω ——圆频率；

$\underline{S}_{xy}(\omega)$ —— $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互谱密度；

$\underline{S}_{xx}(\omega)$ —— $x(t)$ 的谱密度。

附录 D 单向波合成多向波模型试验

D.0.1 采用单向波合成法进行多向不规则波传播与变形、港内水域平稳度模型试验,可按下列步骤进行。

(1)将 $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 范围内组成波波向按 16 个或 8 个方位划分,各波向波能比的累加值按下列公式计算:

$$P_E(\theta) = \frac{1}{m_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (\text{D.0.1-1})$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} S(f, \theta) df d\theta \quad (\text{D.0.1-2})$$

式中 $P_E(\theta)$ ——各波向波能比累加值;

m_0 ——各波向组成波的总能量(m^2);

$S(f, \theta)$ ——方向谱密度 $[\text{m}^2/(\text{Hz} \cdot \text{rad})]$,可采用现行行业标准《海港水文规范》(JTJ213)规定的或其它合适的方向谱密度;

f, θ ——分别为频率(Hz)和波向(rad)。

(2)按表 D.0.1 计算各波向组成波的能量比 D_j ;

不同波向组成波能量比 D_j 表 D.0.1

组成波波向	按 16 个方位划分	按 8 个方位划分
67.5°	$P_E\left(\frac{\pi}{2}\right) - P_E\left(\frac{5\pi}{16}\right)$	-
45.0°	$P_E\left(\frac{5\pi}{16}\right) - P_E\left(\frac{3\pi}{16}\right)$	$P_E\left(\frac{\pi}{2}\right) - P_E\left(\frac{\pi}{4}\right)$
22.5°	$P_E\left(\frac{3\pi}{16}\right) - P_E\left(\frac{\pi}{16}\right)$	-
0°	$P_E\left(\frac{\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{16}\right)$	$P_E\left(\frac{\pi}{4}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{4}\right)$

续表 D.0.1

组成波波向	按 16 个方位划分	按 8 个方位划分
-22.5°	$P_E\left(-\frac{\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{3\pi}{16}\right)$	-
-45.0°	$P_E\left(-\frac{3\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{5\pi}{16}\right)$	$P_E\left(-\frac{\pi}{4}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{2}\right)$
-67.5°	$P_E\left(-\frac{5\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{2}\right)$	-

(3)采用单向不规则波,逐一进行各波向模型试验,测量各点波高,计算比波高;

(4)各测点合成后的综合比波高按下式计算:

$$K_{\text{eff}} = \left(\frac{\sum K_j^2 D_j}{\sum D_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{D.0.1-3})$$

式中 K_{eff} ——考虑了波向分布特点的综合比波高;

K_j ——测点处第 j 个波向入射波时的比波高;

D_j ——不同波向组成波能量比。

附录 E 波浪折射数学模型

E.0.1 水下等深线较为平直且忽略绕射影响时,定常波折射问题的控制方程可表示为:

(1)光程函数方程

$$|\nabla S|^2 = k^2 \quad (\text{E.0.1-1})$$

(2)波能平衡方程

$$\nabla \cdot \left(EC_g \frac{\mathbf{k}}{k} \right) = 0 \quad (\text{E.0.1-2})$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{E.0.1-3})$$

$$\mathbf{k} = \nabla S \quad (\text{E.0.1-4})$$

式中 ∇ ——梯度算子;

S ——波浪相位(rad);

k ——波数(rad/m);

E ——波动能量(J/m²);

C_g ——波浪群速(m/s);

\mathbf{k} ——波数矢量(rad/m);

ρ ——水的密度(kg/m³);

g ——重力加速度(m/s²);

H ——波高(m)。

E.0.2 式(E.0.1-1)和式(E.0.1-2)可采用波向线法或其他有效的数值方法求解。

采用波向线法求解时,可由式(E.0.1-1)和式(E.0.1-2)转化为一阶常微分方程组:

$$\frac{dx}{d\xi} = \frac{p}{k} \quad (\text{E.0.2-1})$$

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = \frac{q}{k} \quad (\text{E.0.2-2})$$

$$\frac{dp}{d\xi} = \frac{\partial k}{\partial x} \quad (\text{E.0.2-3})$$

$$\frac{dq}{d\xi} = \frac{\partial k}{\partial y} \quad (\text{E.0.2-4})$$

$$\frac{dS}{d\xi} = k \quad (\text{E.0.2-5})$$

$$\frac{d\beta}{d\xi} = \gamma \quad (\text{E.0.2-6})$$

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = -P\gamma - Q\beta \quad (\text{E.0.2-7})$$

$$P = \frac{1}{k^2} \left(p \frac{\partial k}{\partial x} + q \frac{\partial k}{\partial y} \right) \quad (\text{E.0.2-8})$$

$$Q = \frac{2}{k^4} \left(q \frac{\partial k}{\partial x} - p \frac{\partial k}{\partial y} \right)^2 - \frac{1}{k^3} \left(q^2 \frac{\partial^2 k}{\partial x^2} - 2pq \frac{\partial^2 k}{\partial x \partial y} + p^2 \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right) \quad (\text{E.0.2-9})$$

$$\beta = \frac{4k}{nH^2} \quad (\text{E.0.2-10})$$

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (\text{E.0.2-11})$$

式中 ξ ——沿波向线的距离(m);

x, y ——波向线位置(m);

k ——波数(rad/m);

S ——波浪相位(rad);

H ——波高(m);

h ——水深(m)。

E.0.3 考虑底摩擦引起的波能损耗时,波高衰减系数 k_f 可按下列公式计算:

$$\frac{dk_f}{d\xi} = -F^* k_f^2 \quad (\text{E.0.3-1})$$

$$F^* = \frac{64}{3} \frac{\pi^3 f}{g^2 T^4} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^4 kh \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)} H \quad (\text{E.0.3-2})$$

式中 k_f ——波高衰减系数;
 ξ ——沿波向线的距离(m);
 f ——底摩阻系数;
 T ——波周期(s);
 g ——重力加速度(m/s^2);
 k ——波数(rad/m);
 h ——水深(m);
 H ——波高(m)。

E.0.4 在波向线初始位置 x_0, y_0 处应给定初始波高、波周期、波向和相位等波要素,并按下列公式计算初始条件:

$$x = x_0 \quad (\text{E.0.4-1})$$

$$y = y_0 \quad (\text{E.0.4-2})$$

$$p = k_0 \cos \alpha_0 \quad (\text{E.0.4-3})$$

$$q = k_0 \sin \alpha_0 \quad (\text{E.0.4-4})$$

$$S = S_0 \quad (\text{E.0.4-5})$$

$$\beta = \frac{4k_0}{n_0 H_0^2} \quad (\text{E.0.4-6})$$

$$\gamma = 0 \quad (\text{E.0.4-7})$$

$$k_f = 1 \quad (\text{E.0.4-8})$$

式中 x, y ——波向线位置座标(m),下标带“0”的为波向线初始位置座标(m);
 k_0 ——初始位置处波数(rad/m);
 α_0 ——初始波向(rad);
 S ——波浪相位(rad),下标带“0”的为波浪初始相位(rad);
 n_0 ——初始位置的浅水系数;
 H_0 ——初始波高(m);
 k_f ——波高衰减系数。

E.0.5 式(E.0.2-1) ~ 式(E.0.2-7)、式(E.0.3-1)和初始条件式

(E.0.4-1) ~ 式(E.0.4-8)构成一阶线性常微分方程组的初值问题,可采用四阶龙格-库塔法沿波向线求解。

E.0.6 解出 β 和 k_f 后,不计底摩阻损耗的波高和计入底摩阻损耗的波高可分别按下列公式计算:

$$H = 2\sqrt{\frac{k}{n\beta}} \quad (\text{E.0.6-1})$$

$$H_f = k_f H \quad (\text{E.0.6-2})$$

式中 H ——不计底摩阻损耗的波高(m);

H_f ——计入底摩阻损耗的波高(m);

k ——波数(rad/m);

n ——浅水系数;

k_f ——波高衰减系数。

附录 F Helmholtz 方程边界元法

F.0.1 等水深情况下的波浪绕射问题可采用 Helmholtz 方程边界元法求解,其控制方程为:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + k^2 \Phi = 0 \quad (\text{F.0.1})$$

式中 Φ ——波浪势函数(m^2/s);

x, y ——平面位置(m);

k ——波数(rad/m)。

F.0.2 式(F.0.1)可改写为如下积分方程的形式:

(1)港外水域中任一点 P 处的二维散射波势表示为:

$$\Phi_d(P) = \int_C \mu_{II}(M) \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M \quad (\text{F.0.2-1})$$

式中 $\Phi_d(P)$ ——港外水域中任一点 P 处的二维散射波势(m^2/s);

$\mu_{II}(M)$ ——港外水域在港湾口门 C 上 M 点处的点源强度(m/s);

k ——波数(rad/m);

r —— M 点至 P 点的距离(m);

$H_0^{(1)}(kr)$ ——零阶第一类 Hankel 函数,是满足 Sommerfeld 辐射条件的一个解;

dS_M ——边界曲线微分单元长度(m)。

(2)港内水域任一点 P 的波势表示为:

$$\Phi(P) = \int_{\Gamma+C} \mu_I(M) \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M \quad (\text{F.0.2-2})$$

式中 $\Phi(P)$ ——港内水域任一点 P 的波势(m^2/s);

$\mu_I(M)$ ——港内水域在港湾边界 Γ 或口门 C 上 M 点处的

点源强度(m/s);

k ——波数(rad/m);

r —— M 点至 P 点距离(m);

$H_0^{(1)}(kr)$ ——零阶第一类 Hankel 函数;

dS_M ——边界曲线微分单元长度(m)。

F.0.3 可利用口门 C 及港湾边界 Γ 处的边界条件建立求解 $\mu_I(M)$ 、 $\mu_{II}(M)$ 的积分方程。

(1) 利用波势连续及波势导数连续条件得口门处边界条件为:

$$\Phi_i(P) = \int_{\Gamma+C} \mu_I(M) \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M - \int_C \mu_{II}(M) \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M \quad (\text{F.0.3-1})$$

$$\begin{aligned} \mu_I(P) + \int_{\Gamma+C} \mu_I(M) \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M - \\ \mu_{II}(P) - \int_C \mu_{II}(M) \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M = \frac{\partial \Phi_i}{\partial n} \end{aligned} \quad (\text{F.0.3-2})$$

式中 $\Phi_i(P)$ ——口门上任一点 P 的二维入射波势(m^2/s);

$\mu_I(M)$ ——港内水域在港湾边界 Γ 或口门 C 上 M 点处的
点源强度(m/s);

k ——波数(rad/m);

r —— M 点至 P 点距离(m);

$H_0^{(1)}(kr)$ ——零阶第一类 Hankel 函数;

dS_M ——边界曲线微分单元长度(m);

$\mu_{II}(M)$ ——港外水域在港湾口门 C 上 M 点处的点源强度
(m/s);

$\mu_I(P)$ ——港内水域在港湾口门 C 上任一点 P 的点源强
度(m/s);

$\mu_{II}(P)$ ——港外水域在港湾口门 C 上任一点 P 的点源强
度(m/s);

Φ_i ——入射波势(m^2/s);

$\frac{\partial}{\partial n}$ ——沿边界外法向的导数。

(2)在港湾边界处的反射边界条件为:

$$\mu_1(P) + \int_{\Gamma+C} \mu_1(M) \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M + \gamma \int_{\Gamma+C} \mu_1(M) \times \left[\frac{1}{2i} H_0^{(1)}(kr) \right] dS_M = 0 \quad (\text{F.0.3-3})$$

$$\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2 \quad (\text{F.0.3-4})$$

$$\gamma_1 = k \cos \alpha \frac{2R \sin \epsilon}{1 + R^2 + 2R \cos \epsilon} \quad (\text{F.0.3-5})$$

$$\gamma_2 = k \cos \alpha \frac{1 - R^2}{1 + R^2 + 2R \cos \epsilon} \quad (\text{F.0.3-6})$$

式中 $\mu_1(P)$ ——港内水域在港湾边界 Γ 上任一点 P 的点源强度(m^2/s);

$\mu_1(M)$ ——港内水域在港湾边界 Γ 或口门 C 上 M 点处的点源强度(m^2/s);

$\frac{\partial}{\partial n}$ ——沿边界外法向的导数;

k ——波数(rad/m);

r —— M 点至 P 点距离(m);

$H_0^{(1)}(kr)$ ——零阶第一类 Hankel 函数;

dS_M ——边界曲线微分单元长度(m);

α ——入射波向与边界法向的交角(rad);

R ——振幅因子;

ϵ ——波浪相位差(rad)。

F.0.4 式(F.0.3-1)~式(F.0.3-3)构成 $\mu_1(M)$ 、 $\mu_{II}(M)$ 的积分方程组,可按下列步骤进行求解:

(1)将港湾边界与口门离散为由许多直线段组成的封闭边界,每一直线段的长度取 $0.1 \sim 0.5$ 倍波长;

(2)在各线段上假定 $\mu_1(M)$ 、 $\mu_{II}(M)$ 为常数,将式(F.0.3-1)~

式(F.0.3-3)离散为线性代数方程组;

(3)求解代数方程组,得出港湾边界及口门上点源强度 $\mu_1(M)$ 和 $\mu_{II}(M)$ 。

F.0.5 可将 $\mu_1(M)$ 代入式(F.0.2-2),计算港内任一点的波势,再由波势表达式确定波高。

附录 G 本规程用词用语说明

G.0.1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度的用词用语说明如下:

(1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

(2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词表示“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

(3)对表示允许稍有选择,有条件许可时首先应这样做的;

正面词采用“宜”或“可”;

反面词采用“不宜”。

G.0.2 条文中指定应按其它有关标准、规范执行时,写法为“应符合……的有关规定”或“应按……执行。”

本规程主编单位、参加单位、 主要起草人、总校人员和管理人员名单

主 编 单 位：南京水利科学研究院

参 加 单 位：大连理工大学

天津港湾工程研究所

主要起草人：左其华(南京水利科学研究院)

杨正己(南京水利科学研究院)

(以下按姓氏笔画为序)

丁炳灿(南京水利科学研究院)

王凤龙(大连理工大学)

王红川(南京水利科学研究院)

王鉴义(南京水利科学研究院)

刘子琪(天津港湾工程研究所)

陈国平(南京水利科学研究院)

杨宪章(天津港湾工程研究所)

张馥桂(南京水利科学研究院)

俞聿修(大连理工大学)

贺辉华(南京水利科学研究院)

黄海龙(南京水利科学研究院)

潘军宁(南京水利科学研究院)

总校人员名单：李永恒(交通部水运司)
黄海龙(交通部水运司)
潘少华(河海大学)
吴以喜(天津水运工程研究所)
刘金培(南京水利科学研究院)
俞聿修(大连理工大学)
刘子琪(天津港湾工程研究所)
左其华(南京水利科学研究院)
陈国平(南京水利科学研究院)
杨正己(南京水利科学研究院)
王红川(南京水利科学研究院)

管理组人员名单：左其华(南京水利科学研究院)
陈国平(南京水利科学研究院)
潘军宁(南京水利科学研究院)

中华人民共和国行业标准

波浪模型试验规程

JTJ/T 234—2001

条文说明

目 次

1 总则	69
2 术语	70
3 波浪物理模型试验的基本规定	71
3.1 一般规定	71
3.2 相似准则	72
3.3 波浪与水流模拟	72
3.4 试验设备和测量仪器	73
3.5 试验数据采集和处理	74
4 整体物理模型试验	77
4.2 边界条件模拟	77
4.3 波浪传播与变形模型试验	77
4.4 港内水域平稳度模型试验	78
4.5 船行波模型试验	78
5 斜坡式和直墙式建筑物断面物理模型试验	79
5.1 一般规定	79
5.2 斜坡式建筑物断面模型试验	79
5.3 宽肩台式抛石防波堤断面模型试验	79
5.4 直墙式建筑物断面模型试验	80
5.5 越浪量和波浪爬高试验	80
6 桩基和墩柱建筑物及水下管线物理模型试验	81
6.1 一般规定	81
6.2 桩基和墩柱建筑物模型试验	81
6.3 带梁板透空建筑物模型试验	81
7 浮式建筑物物理模型试验	82

7.1 一般规定	82
7.3 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型试验	82
8 波浪泥沙物理模型试验	83
8.1 一般规定	83
8.2 沿岸输沙的波浪泥沙模型试验	83
8.3 岸滩横剖面的波浪泥沙模型试验	83
8.4 建筑物附近底床局部冲刷模型试验	84
9 波浪数值模拟	86
9.1 一般规定	86
9.2 风浪数值模拟	86
9.3 开敞水域波浪传播数值模拟	87
9.4 港内水域波浪传播数值模拟	87
9.5 波浪力数值模拟	88

1 总 则

1.0.2 本条中的建筑物系指海岸、近海、内陆水域中的海岸工程、港口工程、近海工程和取排水工程等承受波浪作用的建筑物及其相关设施。

2 术 语

本章术语的主要依据是全国科学技术名词审定委员会公布《水利科技名词》(1997 年),国家现行标准《港口工程基本术语标准》(GB 50186—93)、《航道工程基本术语标准》(JTJ/T 204—96)和《水利水电工程技术术语标准》SL(26—92),以及《水运技术词典》(1984 年)、《中国水利百科全书》(1991 年)等,并按条文原义解释。

3 波浪物理模型试验的基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 波浪物理模型试验和波浪数值模拟试验是解决波浪等动力因素及其对建筑物相互作用问题的重要手段,不同情况、不同要求选用不同方法。

波浪数值模拟试验经过多年的发展,越来越多地应用于波浪及其与建筑物作用的模拟。它具有不受模型比尺的限制、省时和费用少的特点,常在工程规划、可行性研究和方案比较中采用。在外海波要素的确定以及波浪从深水到浅水的传播变形的研究,因涉及到较大范围多种因素的影响,只能采用数值模拟的方法。此外,对工程规模小,边界等条件较简单,数值模拟结果可以满足要求时,一般也采用数值模拟。

当所研究的波浪问题较为复杂,其变化机理尚未有充分认识时,数值模拟的控制方程、边界条件等需作近似处理,波浪数值模拟就显现出一定的局限性。特别是分析波浪对防波堤和较为复杂的建筑物的作用等问题时,建立数值模拟控制方程仍十分困难,在这种情况下,通常采用波浪物理模型试验方法。当研究波浪作用下的泥沙运动时,波浪物理模型试验仍是解决问题的可靠手段。

近年来兴建的大型港口工程、核电站取水工程及跨海轮渡等工程中的波浪问题,同时进行了数值模拟和物理模型试验。在规划和可行性研究中采用数值模拟,对工程方案的进一步优化、确定和修改设计方案时,采用物理模型试验。

3.1.5~3.1.7 试验成果报告是试验成果的具体体现之一,又是执行技术合同的重要组成部分,对工程项目的规划、设计和施工等

起着重要的作用。因此,对试验成果报告的内容及编写格式做出了规定。

3.2 相似准则

3.2.1 波浪物理模型试验选用正态模型的规定,是为满足模型与原型的几何、运动、动力和边界等条件相似所要求的。

3.2.2 为保证模型试验成果的可靠性、减少试验模型的缩尺影响,设计模型时尽量采用较小的模型比尺。条文中对不同试验内容给出了模型比尺的限值。当选择的模型比尺过大时,模拟的原始入射波高和波周期过小,水的粘滞力和表面张力将起显著作用,不能满足重力相似准则,同时也会严重影响试验的测量精度,故对波浪模型试验中的原始入射波高和波周期给出了限值。

3.2.4 波浪物理模型试验采用变态模型时,需注意下列问题:

(1)在变态模型中,波浪的折射、绕射等变形相似难以同时满足,只能根据试验所研究的问题及具体情况,择其主要相似条件进行模拟。当水下地形等深线较为平直、可忽略绕射影响时,按折射相似为主进行模拟;水深变化不大可忽略折射影响时,按绕射相似为主进行模拟。只要模型的变率不大,就可达到波浪绕射或折射的近似相似。在波浪作用下,毛里塔尼亚友谊港泊稳模型试验变率为2.0,泥沙冲淤模型试验变率为1.85,都取得良好的结果;

(2)按变态模型设计制作的岸坡边界和斜坡式建筑物,其坡度比原型要陡,模型的反射系数比原型大,会影响试验成果。这时,要做到岸坡边界和斜坡式建筑物模型的反射系数与原型一致,通常采用将岸坡及斜坡式建筑物的模型设计成正态,或在试验水槽中测得正态建筑物模型情况下的反射系数,再用加糙、增加模型的孔隙率和适当改变岸坡或斜坡的坡度等方法,使其反射系数与原型一致。

3.3 波浪与水流模拟

3.3.1 波浪与水流常是共存且相互作用,因此,试验中除模拟波

浪外,有时还需模拟波浪和水流。

3.3.2 波高分布相似性对试验结果有明显影响,故波高分布也要与原型相似。条文中的 1% 累积频率波高、有效波高与平均波高之比的允许偏差,是对波高分布相似的基本要求而规定的。

国内外多采用线性叠加法模拟多向不规则波。大连理工大学的研究表明,一般的双叠加法所得波浪在空间上不均匀,且不符合各态历经性的要求。单叠加法基本上能满足空间均匀性和各态历经性的要求,而频率方向对应法所得波浪的空间均匀性好,故在多向不规则波数值模拟和制作造波机的驱动信号时,建议采用频率方向对应法,也可采用单叠加法。

工程设计中,一般认为波浪方向可分布在主波向两侧各 90° 的范围内。但当波浪方向分布较窄或某些方向受到陆地等掩护时,宜恰当地选定波浪分布的范围 θ_{\max} 和 θ_{\min} 。还需把无波能传来的方向排除。

条文中频域分割数 M 和方向分割数 I ,是根据大连理工大学的研究结果。条文中频域,也可以采用不等量分割。

3.4 试验设备和测量仪器

3.4.1 执行本条时需注意下列问题:

(1)对试验水槽或水池的建造质量需严格把关,使其不致影响造波质量;

(2)在水槽或水池中进行波浪对建筑物作用的试验时,来自水槽或水池边界和建筑物模型的反射波传至造波机会产生二次反射波,它与造波机产生的波叠加,必将改变试验所要求的波浪条件。因此,试验中要采取措施消除或减小二次反射波的影响。

为消除和减小二次反射波的影响,对规则波可采用间断造波法,即当造波机的二次反射波将传至建筑物模型前就停止测试。对不规则波,通常把试验水槽隔成两条或三条的窄水槽,用一侧或中间窄水槽做模型试验。并在水槽中相对于造波机的另一端设 $1:10 \sim 1:15$ 的缓坡,以消减波能,减小二次反射波。显然,设置反

射波吸收器或安装无反射造波机等当是最有效的方法。

3.4.3 作用于建筑物上的波浪力是动荷载,而波压力及总力传感器的率定,常是以静荷载为条件进行的。分析表明,只有当波浪传感器的自振频率大于被测力的自振频率4~6倍时,所引起的误差才是可以忽略的。

3.5 试验数据采集和处理

3.5.1 (1)波浪模型试验中,为使测量仪器获得的模拟信号转化成能用计算机进行数字运算的形式,需对试验数据离散化,即对连续信号每隔一定的时间间隔 Δt 采样。 Δt 的选择对试验成果的分析影响甚大,以波高分析而言, Δt 取值过大,获得的波高值和按连续信号变化过程获得的波高相差较大。又如作波谱分析时, Δt 取值过大,谱分量将产生折叠,谱会显著失真。反之, Δt 取值过小,将增加样本数和计算工作量。条文中规定的 Δt 取值,是参考了国内外现场波浪观测和室内波浪模型试验数据采集的经验而提出的。

(2)试验中处理波浪数据时,一般采用上跨零点法或下跨零点法分析波高和波周期。在分析不规则波波高、波周期时,为去除零线附近处的微小波动,需设一阈值。阈值的大小可按波高、波周期和仪器性能等具体情况设定。

(3)在波浪模型试验数据处理前,对因设备、仪器的故障和外部条件的干扰等,使所测得的试验数据出现异常时,需用人工或计算机来检查数据是否存在过失误差、系统误差,并用经验的或理论的分析方法,剔除异常值。

3.5.2 (1)在试验水池中测定多向不规则波方向谱的方法主要有两种。波高仪阵列法简单易行,但阵列占用一定的水域,测得的是此范围内的平均方向谱。而双向流速仪法可把流速仪和波高仪或底压仪布置在一条垂线上,但一般只测量3个波动过程,所给出的方向谱的精度就有限。

大连理工大学的研究表明,用波高仪阵列法需同步测量的波

面一般不少于 4 个。波高仪间的最小间距需小于谱峰频率对应波长的 0.3 倍。研究还表明,在各种分析方向谱的方法中,采用贝叶斯法,能给出比较符合实际的结果。但该法计算工作量大,故也可用经过验证的其它方法,如最大似然法或最大熵法等。

(2)表征多向不规则波的参数很多,本条中列出的各参数主要参考了国际水力学会议制定的海况参数表中关于多向波的更新意见(1997 年)确定的。除有效波高、谱峰周期和平均波向外,还选用了 $\sigma_\theta(f)$ 表征方向分布宽度,因其不受具体的方向分布函数形式的影响,更具有代表性。

(3)当多向不规则波遇建筑物反射时,在建筑物前形成入、反射波共存场,波能的方向分布成双峰或多峰值。此时,需先把入、反射波分离后,才能分别确定入、反射波的平均波向和方向分布宽度,再确定建筑物对波浪的反射系数。因此,要在建筑物前同步测定 5 个或更多个波动量,才能保证分析结果的精度。

3.5.4 (1)作用于建筑物上的波浪力数据采集时间间隔,由波浪及波浪力的性质而定,一般小于波要素数据采集的时间间隔。当波浪完全破碎、波浪力为冲击力,数据采集时间间隔要更小。采用滤波处理波浪力时,选定大于波浪冲击力的最高频率作为截止频率。对波浪冲击力还要避免把测力系统引起的波动误认为波浪力值。

(2)波浪力数据采集的起始和终止时间,需和波要素数据采集的起始和终止时间相对应。

(3)用规则波做试验时,测得的波浪力不一定规则,尤其是破碎波情况下,波浪力的大、小值间有较大差距,且具有随机性。因此,对规则波破碎冲击力除要求给出平均值外,尚需进行统计分析,给出其特征值。为此要增加测量次数。

3.5.5 对不规则波试验,按两点法或三点法将入、反射波分离,得到入、反射波总能量,即可按本条的式(3.5.5-1)求得不规则波的反射系数。进一步求得入、反射波高。

对规则波试验,在建筑物模型前的波腹点处设置波高仪,测得

最大合成波高 H_{\max} , 减去无建筑物模型时模拟的原始入射波高 H_1 , 得到反射波高 H_R , 进而按本条式(3.5.5-2)求得规则波的反射系数, 但此法精度不高。

对规则波也能用入、反射波分离法, 按式(3.5.5-1)求反射系数。

3.5.7 波群分析的方法以及表征波群特性的参数均较多, 经分析比较后采用大连理工大学提出的群高因子及日本合田良实提出的平均连长来表示波群参数。“连长”为波高大于某一规定值的连续波浪个数, “平均连长”为波列中若干个“连长”的平均值。

4 整体物理模型试验

4.2 边界条件模拟

4.2.1 造波机与建筑物模型的间距,以及防波堤堤头与水池边界的间距是根据国内外波浪模型试验的经验,并考虑波浪得到充分平稳和波浪的折射、绕射和反射不受边界影响而规定的。平均波长系指平均波周期对应的波长。由于造波机性能等条件限制,多向造波机造出的波只在一定范围内满足要求,故进行多向不规则波试验时,模型需放置在有效区内。

4.2.3 当工程水域有波浪等动力因素实测资料时,在试验模型尤其是变态模型制作完成后正式试验前,需对试验模型中模拟的波浪相似性进行验证,当不满足相似要求时,需查找出原因,调整试验参数,达到相似后,方能进行正式试验。

工程水域无实测资料时,需对模拟的波浪特征及其变化进行分析、比较和判断,确认为合理后,方能进行正式试验。

4.3 波浪传播与变形模型试验

4.3.3 原始入射波的测波点需放在水深较大、波形较平稳处。若模型较宽、沿横断面上波高不均匀时,多设测波点,取各点实测波高的平均值代表原始波高。为避免各波高仪传感器的相互干扰,故对测点间距作了限制。

4.3.4 本条所指的比波高为测点波高和原始入射波高之比,对于不规则波,则为同一累积率的测点波高与原始入射波高之比。

4.3.5 采用单向波合成法进行多向波模型试验,是在没有多向不规则波造波机设备,而又需进行多向不规则波的传播与变形等试

验的情况下提出的一种替代办法。附录 D 指的是用单向不规则波进行多向波合成模型试验,若采用规则波,除划分不同波向外,每一波向还需划分不同频率进行试验,然后合成。

4.4 港内水域平稳度模型试验

4.4.3 试验中采用规则波时,当波浪传至直墙式建筑物处,会产生反射波,入、反射波叠加后波面振幅在波腹处最大,波节处最小,故要求增设的测波点放在波腹处测最大波高。

4.4.5 长周期波以及波群在港域内引起共振时,船舶的泊稳条件将急剧恶化,试验中要注意观测,并研究避免产生共振的措施。

4.5 船行波模型试验

4.5.2 船行波属于重力波范畴的一种水面波动,故其模型按重力相似进行设计。天然水域中船行波波高一般较小,为了保证试验精度,其模型比尺不能取得太大。南京水利科学研究院在研究运河中船行波时取模型比尺为 25。为研究其比尺影响曾对特定船型进行了对比试验,认为比尺为 15、25 时所得结果基本一致,而比尺为 50 时结果偏小过多。美国海岸工程研究中心以及荷兰 Delft 水工试验室等单位研究船行波对护岸建筑物作用试验的模型比尺取 10~25。

研究船行波对护岸建筑物的作用时,如采用拖曳或自航船产生的船行波很小、试验存在困难时,可采用造波机产生船行波。

5 斜坡式和直墙式建筑物 断面物理模型试验

5.1 一般规定

5.1.5 斜坡式建筑物护面块体包括护面人工块体及块石。波浪作用下斜坡式建筑物护面块体的失稳,通常是由于块体的单块质量不足而引起。对瘦长的杆件块体如扭工字块,虽然块体单块质量较大,在波浪作用下也会因摇摆、相互碰撞而断裂,其单块质量减小、块体间失去咬合作用而失稳。因此,对重大工程项目采用较大的瘦长杆件护面块体时,在模拟单块护面块体质量的同时还需模拟块体的强度。

块体的强度模拟,包括抗弯强度、抗压强度等的模拟,但导致块体断裂主要是抗弯强度,故以此作为模拟强度的控制指标。

5.2 斜坡式建筑物断面模型试验

5.2.1 波浪对建筑物累计作用时间是根据我国沿海暴风浪或一个台风过程的持续时间定出的。

5.2.4 胸墙和直墙式建筑物底与下部结构间的摩擦系数与墙体抗滑力密切相关,故进行稳定性试验观测抗滑稳定性时,需检测其摩擦系数。

5.2.5 测量斜坡面上的波压力主要是为建筑物结构设计提供波浪荷载,故需给出沿坡面各测点的最大压力分布。

5.3 宽肩台式抛石防波堤断面模型试验

5.3.2 宽肩台式抛石防波堤设计断面稳定性试验,需从高水位到

低水位,又从低水位到高水位往复进行。每一水位情况下的波浪作用时间,以防波堤断面的变形不再发展为准。

5.4 直墙式建筑物断面模型试验

5.4.3 在分析直墙上的波压力和墙底上托力时,视试验要求给出结果。为校核直墙的稳定性时,给出水平力最大时同步压力以及建筑物滑动稳定安全系数最小时的同步压力分布;当墙身结构设计需要时,给出各点最大压力分布。

5.5 越浪量和波浪爬高试验

5.5.2 研究表明,单个波的单宽最大越浪水量(m^3/m)对建筑物结构的安全至关重要,有条件时,需进行单个波的越浪水量的测量。

5.5.3 在没有不规则波造波设备而又需要做越浪量试验的情况下,可按本条的替代方法用规则波做越浪量试验。此时,波高的分级数需适当多一些,波高概率分布应符合现行行业标准《海港水文规范》(JTJ 213)的规定。

5.5.5 风对建筑物的越浪量和波浪爬高影响较大,故对越浪量及波浪爬高试验常要求加风。

6 桩基和墩柱建筑物及水下管线物理模型试验

6.1 一般规定

6.1.1 采用轻质、刚劲的材料制作测力模型,可提高其自振频率和测力精度。在某些海区,因海生物附着严重,导致对桩和管线的波力增大,此时需模拟桩和管线的糙率。

6.1.2 在波浪作用下,桩、墩模型与波高仪、水槽或水池壁的距离较小时,彼此会发生干扰,影响试验结果的正确性。对于圆形桩,不受邻桩影响的最小中心距与桩径之比,《海港水文规范》(JTJ 213)规定为大于和等于 4,前苏联规范 СНиП II-57-75 规定为大于和等于 2.5;大连理工大学等单位的试验结果为大于和等于 4,且有随 KC 数和桩数增加而增大的趋势。非圆形断面的干扰还要大些。条文中给出的是对净距的要求。有流的影响时,本条所规定的间距还要适当放大。

6.2 桩基和墩柱建筑物模型试验

6.2.3 测量桩基、墩柱式建筑物上波浪力时,为了分析波浪力,需在水槽或水池中模型同一断面处测定波面。

6.3 带梁板透空建筑物模型试验

6.3.2 设计带梁板透空建筑物时,遇到的主要问题是确定波浪对梁板的上托力,为了使梁板和波面之间空腔中的压缩空气有个出路以减小上托力,常在面板上开设泄压孔,试验中要予以模拟。但如直接按几何比尺模拟,每个孔的尺度可能很小,其泄压效果难与原型相似,需根据具体情况加以处理。

7 浮式建筑物物理模型试验

7.1 一般规定

7.1.1 浮式建筑物包括船模。进行浮式建筑物和船模的质量及重心位置模拟时,通常用调整压载的质量和位置来达到要求。

7.1.3 低频率长周期波对浮式建筑物的运动、锚链力、系缆力和撞击力等影响极大,故有特殊要求时,要考虑波群及二阶长波的作用。

7.1.4 本条规定是对接触式测量仪器而言,如采用非接触式测量仪器,则不受此限。

7.3 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型试验

7.3.4 ~ 7.3.5 式(7.3.4)和式(7.3.5)是英国 Wilson 通过尼龙、钢和棕缆绳拉伸试验获得的。在无缆绳实测资料时,通常用该式模拟缆绳的弹性相似。

7.3.6 系泊船舶的运动量、撞击力和系缆力,随时间的变化其变动性极大。试验中需根据变动性的强、弱来确定测量波数、相应时段内的波浪力峰值个数和试验次数。变动性较强时,还需适当增加试验次数。

测量系泊船舶等浮体的运动量时,由于测量仪器及布置等原因,测得的是各运动量耦合的结果时,需根据测量仪器的性能和布置情况进行修正。

8 波浪泥沙物理模型试验

8.1 一般规定

8.1.2 波浪泥沙模型试验中,从波浪运动相似而言,要求采用正态模型。但因场地限制及模型沙选择上的困难,需将试验模型制作成变态。为使波浪运动近似相似,变率需尽可能小。

8.1.6 为消除波浪泥沙模型试验中偶然性及人为因素的影响,保证试验成果的可靠性,每次试验需至少进行两次。

8.2 沿岸输沙的波浪泥沙模型试验

8.2.2 天然情况下的波浪是不规则的,因而在波浪泥沙模型试验中宜采用不规则波。但影响波浪沿岸输沙模型试验的因素较多而且复杂,目前一般采用规则波,即取不规则波的代表波进行波浪泥沙模型试验。

8.3 岸滩横剖面的波浪泥沙模型试验

8.3.2 本条的相似比尺是对变态模型而言的。如各式中 $\lambda_l = \lambda_h = \lambda$,即为正态模型相似比尺。

8.3.4 岸滩横剖面的波浪泥沙模型试验需连续运行,故要求在造波机二次反射较小的水槽内进行,使得波浪性质与原型相似,从而保证试验结果的可靠性。

8.3.6 在波浪作用下,岸滩横剖面呈现两种变化。当水面相对平静、波浪相对较小时,形成滩肩较宽的“常浪剖面”;大风浪期,水位也相应较高,形成以沙坝为特征的“暴风剖面”。一年中不同季节的波浪条件变化时,岸滩剖面就在上述两种形式之间变化。因此,

需根据试验目的和要求分别进行这两种岸滩横剖面变化的稳定试验,或它们的交替演变过程。

8.4 建筑物附近底床局部冲刷模型试验

8.4.2 规则波的情况下,任何相邻腹点间的冲刷剖面是相同的。而在不规则波的情况下,冲刷谷和堆积峰虽大致发生在与平均波周期相应的“节点”和“腹点”的位置上,但各冲刷谷的最大深度和各堆积峰的最大高度随距直立堤距离的增加而很快减小。故宜采用不规则波进行建筑物附近沙床局部冲刷的试验。

已有的试验结果表明,若以有效波高作为规则波试验中的代表波高,得出的最终冲刷深度将稍偏大。

8.4.3 直立堤前局部冲刷的模型试验表明,在立波作用下,堤前沙底的冲刷形态有两类:一类是沙底在立波的节点处冲刷;另一类是沙底在立波节点与腹点的中部冲刷。研究表明,式(8.4.3)中的无因次参数 $(u_b - u_0)/\omega_s$,能用于判别这两类不同的冲刷形态,当该参数值较大时,泥沙运动将以悬移质为主,相应于泥沙颗粒较细的情况;反之,泥沙运动将以推移质为主,相应于泥沙颗粒较粗的情况。因此,为满足泥沙运动和冲刷形态的相似,要保持该参数的模型值与原型值相等,或至少在同一数量级内。

国内有关斜坡堤前沙底冲刷和圆柱式建筑物周围的沙底冲刷的试验研究中,也采用了与上述相同或基本相同的无因次参数来判别冲刷形态。因此,式(8.4.3)基本上适用于斜坡式、直墙式和墩柱等建筑物,以及未破碎和破碎波等波态。

8.4.4 对于大多数情况,浅水波底部水质点轨道运动速度比泥沙起动流速大得多,式(8.4.3)可简化时,则有:

$$\lambda_{\omega_s} = \lambda_{u_b} = \lambda^{1/2}$$

其中的 λ_{ω_s} 和 λ_{u_b} 分别为 ω_s 和 u_b 的模型比尺。

当泥沙的中值粒径 $d_{50} < 0.1\text{mm}$ 时,适用 Stokes 泥沙颗粒沉速公式。当模型沙与原型沙的重度相同时,则有:

$$\omega_s \propto d_{50}^2$$

$$\lambda_{\omega_s} = \lambda_{d_{50}}^2$$

因此,

$$\lambda_{d_{50}} = \lambda^{1/4}$$

而当 $0.1\text{mm} \leq d_{50} < 2.5\text{mm}$ 时,

$$\omega_s \propto d_{50}$$

$$\lambda_{\omega_s} = \lambda_{d_{50}}$$

因此,

$$\lambda_{d_{50}} = \lambda^{1/2}$$

9 波浪数值模拟

9.1 一般规定

9.1.1 各种波浪数值模型均有一定的适用范围。当计算水域可划分为具有不同特点、适用于不同数值模型的几个区域时,在各区域内选用各自适合的数值模型,使获得更为合理的计算结果。多种数值模型嵌套使用时,需注意数值模型在各区域边界处的协调。

9.1.2 工程区水域内的波浪状况要受邻近水域波浪和周围边界的影响,波浪数值模拟中确定计算水域时需考虑这些影响,避免因边界模拟不当而给计算结果带来误差。

9.1.3 波浪数值模拟的边界有开边界、部分和全反射边界、全透射边界等。不同的数值模型具有不同的边界处理方法,只有给出合适的条件才能获得较好的结果。

9.1.6 条文中的试验资料系指已被验证过的波浪物理模型试验成果,或被验证过的、公认的波浪数值模拟成果资料。

9.2 风浪数值模拟

9.2.1 风浪数值模拟通常用于计算近岸波浪数值模拟起算水深以外水域的波要素,以及计算封闭、半封闭的港湾、河口、水库等局部水域内生成的风浪。

9.2.3 源函数项的计算中,风浪成长阶段,需计入波与波相互作用项或波与水流相互作用项。

较规则的气压场主要指热带气旋等气压分布近似呈圆形的气压场。国内外常采用的圆形气压场模型有藤田、高桥、Myers 等人的气压模型。

9.3 开敞水域波浪传播数值模拟

9.3.2 缓坡方程是基于缓坡和小振幅波假定基础上建立的。Booij 的研究表明,当水下地形的底坡坡度缓于 1:3 时,采用缓坡方程计算结果和三维势流方程计算结果符合良好。缓坡方程及其数值解法仍在不断的改进,以使其能考虑非线性影响和用于范围较大的计算水域。

经典的 Boussinesq 方程仅适用于水深较浅的波浪传播计算,为使该方程能用于较大水深,近年已提出了多种改进的 Boussinesq 型方程。Boussinesq 型方程大多不作缓坡假定,计及了非线性影响,适合水下地形底坡较陡的波浪传播计算。

抛物型缓坡方程是在椭圆型缓坡方程基础上,忽略与波浪传播相反方向的反射波,并假定传播过程中波向变化不大而获得的。与椭圆型缓坡方程和 Boussinesq 型方程相比较,其计算效率高,适合于大范围开敞水域的波浪传播计算。根据 Kirby 的研究,考虑波浪的非线性影响,波浪传播可允许在 $\pm 45^\circ$ 范围内变化。

9.3.3 工程应用中,常以一个控制点的波要素代表一段建筑物或一个工程区域的设计波要素。为消除数字噪音等偶然性对计算结果的影响,控制点的波要素以该控制点计算值及其附近点计算值综合确定。

9.4 港内水域波浪传播数值模拟

9.4.3 Helmholtz 方程是等水深条件下缓坡方程的一种简化形式,适用于水深变化不大、波浪折射作用不明显的港内波浪计算。

9.4.5 计算大型港域内波要素时,如局部风成波影响显著,需计及风成波的影响。

9.4.6 波浪在有航道的水域内传播,其传播方向与航道的轴线方向斜交时,航道对波浪的折射及绕射均有影响,与航道轴线方向交角较小时,其影响尤为显著。因此,只有用同时反映波浪折射及绕射的数学模型才能正确模拟有航道时的波浪场。

9.5 波浪力数值模拟

9.5.2 大尺度结构物所受的波浪力以惯性力为主,故可采用势流方程求解。

9.5.3 此条适用于可用势流方程求解波浪力的情况。波浪作用下结构物发生振动并兴起波浪时,其波浪力的计算,需考虑入射波、绕射波和辐射波的共同作用,并分析波浪对结构物的振动,特别是共振的影响。

9.5.5 和物理模型试验相类似,对数值波浪水槽或水池进行验证时,需注意水槽或水池边壁的反射。若反射影响较大,要采取措施减小反射,或在反射波到达结构物前停止计算。