

· 综合 ·



物理模型试验波浪模拟控制标准讨论

夏运强, 李玉龙, 柳玉良, 沈如军

(海军工程设计研究院, 北京 100070)

摘要: 简述涉海工程实验室不规则波模拟技术, 列举和分析了现有行业标准关于依据波制作的有关规定, 结合多年实践经验以案例形式对单向不规则波的物理模拟关键问题进行探讨, 提出了一套实用可行的波浪模拟控制标准, 为高质量开展波浪物理模型试验提供保证。

关键词: 海洋工程; 物理模型试验; 波浪模拟; 依据波制作; 单向不规则波; 有效波

中图分类号: TV 139.2; U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0011-05

Discussion on wave simulation control standards in wave physical model tests

XIA Yun-qiang, LI Yu-long, LIU Yu-liang, SHEN Ru-jun

(Navy Institute of Engineering Design & Research, Beijing 100070, China)

Abstract: A brief introduction about the irregular wave simulation technique for marine hydraulic engineering laboratory is given first, and the corresponding stipulations about reference wave making in the existing industry codes are listed and explained. Combined with years of working experience and some cases, the key questions about physical simulation for the unidirectional irregular wave are discussed. A set of practical and feasible simulation control standard is proposed here, which may ensure high quality in carrying out the wave physical model test.

Keywords: ocean engineering; physical model test; wave simulation; reference wave making; unidirectional irregular wave; significant wave

波浪物理模型试验是海洋工程、港口工程和船舶工程等涉海领域开展理论研究和解决实际工程问题的有效手段, 对依据波(即目标波浪)进行准确模拟是波浪模型试验的基本要求和关键环节, 它直接决定试验成果的可靠性。

交通部颁发的《波浪模型试验规程》^[1](简称《规程》)是开展波浪模型试验需要遵循的国家行业标准, 该标准对波浪物理模型试验中依据波制作进行了较为严格的规定, 但该规定侧重频谱的模拟, 对波列模拟要求较低, 这会造成某些试验, 如堤顶越浪、结构稳定等试验结果的差异, 影响试验结论和成果应用。

本文对实验室不规则波模拟技术进行简单叙述, 讨论了现有行业规范的有关规定, 结合多年试验经验以案例形式对单向不规则波的模拟标准进行了探讨, 提出一套实用可行的模拟思路, 供波浪物理模型试验技术人员参考借鉴, 为高质量开展模型试验工作提供保证。

1 波浪分析方法及参数对应关系

1.1 波浪分析方法

实际海浪可看作各态历经的平稳随机过程^[2-3], 对波浪特征的描述可采用频域上的谱分析和时域上的统计分析两种方法, 后者对波列的波

收稿日期: 2016-03-08

作者简介: 夏运强(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 注册土木工程师(港航), 从事港口、海岸及近海工程设计、试验和研究工作。

高和周期等进行统计分析,得到代表波或特征波。波列统计分析方法又包括部分大波平均值法和超值累积频率法^[4]。常用部分大波平均值定义的特征波 H_p 有: $H_{1/100}$ 、 $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ (或 H_s 为有效波高, T_s 为有效波周期)、 H 及对应周期。常用累积频率定义的特征波 H_F 有: $H_{0.4\%}$ 、 $H_{1\%}$ 、 $H_{4\%}$ 、 $H_{5\%}$ 、 $H_{13\%}$ 及对应周期。谱分析主要参数有: 谱矩 m_0 (谱能量)、谱峰周期 T_p 、峰频值 S_{\max} 。

1.2 波浪参数对应关系

3种波浪分析方法的特征值或参数间可以建立相互关系,常用的关系式有: $H_{1/3} \approx H_{13\%}$, $H_{1/10} \approx H_{4\%}$, $H_{1/100} \approx H_{0.4\%}$, $T_p = 1.05T_s$, $T_s = 1.15T$, 上述关系式作为正式条文列入我国《港口与航道水文规范》^[5]中。

另外,大量实测资料表明: $H_{1/3}$ 与 m_0 关系最为稳定,且满足如下关系:

$$H_s = H_{1/3} = 4.0\sqrt{m_0} \quad (1)$$

我国行业规范设计波浪标准采用累积频率特征值,如: $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ 、 $H_{5\%}$ 用于结构强度和稳定计算, $H_{4\%}$ 用于校验港域平稳。

上述关系式也是实验室进行依据波制作的基本依据。

1.3 常用海浪谱

通过对实测海浪数据进行谱分析,可以得到各种谱型,常用的海浪谱^[6]有文氏谱、Jonswap、P-M谱、B-M谱、Wallops谱等,其中Jonswap是在中等风况和有限风距情况下测得,多数使用经验表明,此谱和实测结果相符,且适用于不同成长阶段的风浪,因此在国内外得到广泛应用。日本合田良实建议在工程应用中采用改进的JONSWAP型谱^[2],该谱谱峰升高因子 γ 取 3.3,国内外各水工实验室普遍采用该谱。

波浪物理模型试验需要对给定的谱型进行模拟,该谱称为目标谱或靶谱。

2 波浪模拟方法及有关规定

2.1 实验室波浪模拟方法

理论上波浪可分为规则波和不规则波两类,

不规则波更接近于天然海浪,但模拟技术相对复杂;不规则波又分为单向不规则波(单向谱)和多向不规则波(方向谱)。单向不规则波是目前各试验室波浪物理模型试验采用最多的波浪形式。

基于线性波浪理论,实际海浪可由多个(理论上为无限多个)不同周期和不同随机初位相的余弦波叠加而成,即线性波浪叠加。现有实验室多是采用造波机方式通过模拟频谱来模拟海浪,即将目标谱(靶谱)在有效频率范围采用等分能量或等分频率方法划分成 N 个区间,将代表 N 个区间内波能的 N 个余弦波动叠加起来,即得海浪的波面。

目前实验室主流造波机一般采用伺服机构控制、低惯量电机驱动的板式造波方式^[7-8],通过建立造波板运动与波浪要素之间的传递函数,由造波板机械运动产生目标波浪。造波机配备造波软件,一般均具有造波驱动信号自动修正功能,可以方便地进行依据波制作。

2.2 波浪模拟有关规定

《规程》规定:“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 $\pm 15\%$ ”。其中前 4 条主要保证波谱的拟合,第 5 条是为保证波高分布与原型相似。

《规程》同时规定:“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,在波浪平稳条件下,连续采集的波浪个数不应少于 100 个”。

3 依据波制作控制标准

3.1 试验波浪特征值选用原则

如前所述,工程应用中设计波浪一般以累积频率特征值(H_F)形式提供,如 $H_{1\%}$ 、 $H_{4\%}$ 、 $H_{5\%}$ 、 $H_{13\%}$ 、 H 、 T ,试验中需要据此进行依据波的模拟。

对于依据波的制作,现有《规程》侧重波谱

的模拟, 即实现试验谱和目标谱有效拟合, 这仅可以保证波浪特征值 H_s 和 T_s 的准确模拟, 但无法保证其它统计特征值的模拟精度。这是由于波谱与波浪过程线(波列)不存在一一对应关系, 波谱相同, 但波浪过程线及其统计特征值并不唯一, 有时差别明显。实际工程中, 有时不是一种具有统计特征的波浪, 而是某种特殊的波列或波序对试验需解决的问题起控制作用, 例如波群对建筑物的破坏作用^[9-10], 这时需要严格模拟波列, 保证其它起控制作用的波浪特征值的准确性。针对此问题, 《规程》中补充条文“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 $\pm 15\%$ ”, 但此规定较为粗略笼统, 且允许偏差范围过大。

实际上, 不规则波依据波制作时实现设计波浪所有统计特征值的准确模拟十分困难, 合理的解决方法是根据试验目的和内容来选定需要准确控制的特征值。归纳整理涉海工程波浪物理模型试验关注和解决的技术问题, 建议依据波统计特征值选用标准见表 1。

3.2 试验波列统计方法差异

设计波浪一般为大重现期波浪, 通常对应于某种特定暴风浪状态, 持续时间一般不小于 2 h 时^[1], 连续波浪个数一般不小于 1 000。试验波浪和实际海浪存在的差异在于: 试验波列一般长度较短, 各实验室对单向不规则波依据波制作波数一般控制在 100~150 个, 尽管理论上基于波浪各

表 1 建议不规则波依据波制作特征值选用标准

试验内容	波浪统计特征值
水域平稳度测试	$H_s, H_{4\%}, T_s$
越浪或爬高测试	$H_s, H_{1\%}, H_{4\%}, T_s$
斜坡堤护面护底结构稳定	$H_s, H_{5\%}, T_s$
斜坡堤胸墙稳定	$H_s, H_{1\%}, T_s$
直立堤(码头)结构稳定	$H_s, H_{1\%}, T_s$
桩基或墩柱波压力、水下水管、带梁板透空建筑物	$H_s, H_{1\%}, H_{4\%}, H, T_s$
系泊浮体运动和受力	$H_s, H_{1\%}, H, T_s$
波浪泥沙运动	H_s, T_s

态历经的假定认为试验波列(样本)可代表长序列的现场波浪(总体), 但实际上其特征值还是存在一定的差异, 尤其是大浪(如: H_{max} 、 $H_{1\%}$ 、 $H_{1/100}$)数值的离散性大, 这会影响越浪、波压力测试等项目结果的可靠性。

由于设计波浪一般以累积频率特征值给出, 理论上, 试验波列统计方法应该采用超值累积频率法, 但这种方法存在如下问题: 1) 由于样本长度限制会导致统计出的 $H_{1\%}$ 、 $H_{4\%}$ 等低频率大波具有较强的离散性, 其代表性差; 2) 波高数据组距不同会导致统计特征值的差异; 3) 对散点数据的拟合方法也会导致统计特征值的差异。下面以某试验案例说明这种差异, 图 1 为该案例依据波历时曲线, 该波列按照上跨零点法统计波数, 共 124 个波。图 2 和表 2 说明试验组距差异, 可见, 同样一组试验波浪数据, 采用三次函数拟合时, 不同组距导致的累积频率特征值与目标值差异接近 10%。

表 2 波列统计方法差异性对比

序号	累积频率 H_F	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	H_{mean}/m	T/s	T_s/s	说明
(1)	目标值	14.90	12.50	9.91	6.16	12.86	14.79	
(2)	试验值 1	14.41	13.44	10.82	6.35			分组数 30, 三次函数拟合
(3)	试验值 2	13.91	12.93	10.30	6.35			分组数 60, 同上
(4)	试验值 3	13.86	12.88	10.23	6.35			分组数 100, 同上
	(2)/(1)	0.97	1.08	1.09	1.03			
	(4)/(1)	0.93	1.03	1.03	1.03			
大波统计 H_p		H_{max} 或 $H_{1/100}/m$	$H_{1/10}/m$	$H_{1/3}/m$	H_{mean}/m	T/s	T_s/s	
(5)	试验值	14.72	12.36	9.80	6.35	13.90	14.62	波数 124
	(5)/(1)	0.99	0.99	0.99	1.03	1.08	0.99	
	(5)/(2)	1.02	0.92	0.91	1.00			

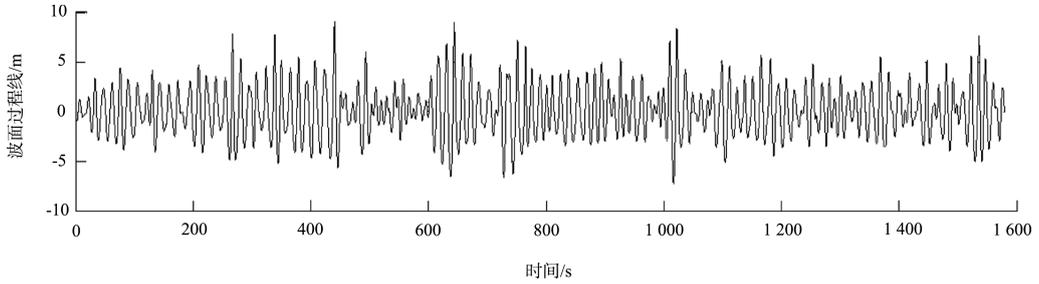


图1 某试验案例依据波历时曲线

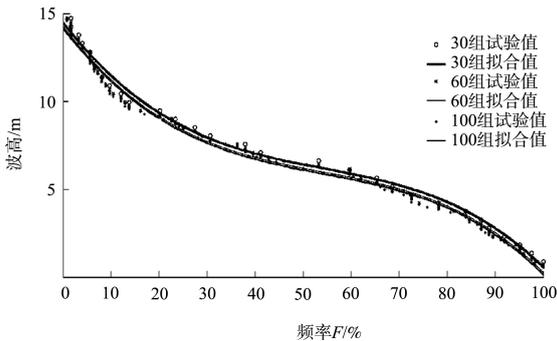


图2 某试验案例超值累积频率统计方法结果比较

相对而言,部分大波平均值法简单且明确统一,无相关参数影响,统计特征值唯一,易于试验采用,尤其适用于有对比要求的试验项目中,可有效保证输入条件的统一,使试验结果具有可比性。

关于波列两种统计方法特征值的关系,尽管设计规范^[5]规定: $H_{13\%} \approx H_{1/3}$, $H_{1/10} \approx H_{4\%}$ 等,这是基于现场长序列波浪统计出的近似关系结论,但实测资料和试验案例均表明:通常情况下, $H_{4\%} > H_{1/10}$, $H_{13\%} > H_{1/3}$,且波列长度对差值有一定影响,当波列较短时,二者差值可能会变大。表2列举了某试验同一依据波波列统计结果,该波列两种特征值差值(5)/(2)接近10%,远大于《规程》规定的5%的标准。另外,部分大波平均值特征值(如 $H_{1/3}$)要小于对应的累积频率特征值(如 $H_{13\%}$),这种情况下,试验波列若仍采用累积频率方法控制,会造成谱能量(以 $H_{1/3}$ 代表)较目标谱偏小,试验结果偏于危险。相对而言,采用部分大波平均值作为控制标准较为合理。

3.3 波浪特征值 $H_{1\%}$ 的模拟讨论

对于设计标准中明确提出要模拟 $H_{1\%}$ 的情况,在依据波短序列条件(波数 100~150)下,采用累积频率方法统计出的 $H_{1\%}$ 具有较大的误差范围,此时,可以近似按照统计波列的 $H_{\max} = H_{1/100} = H_{1\%}$ 控制。在设计标准未明确要模拟 $H_{1\%}$ 时,则依据波 H_{\max} 可按其众值与 H_s 关系^[2]控制:

$$(H_{\max})_m / H_{1/3} \approx 0.706 \sqrt{\ln N_0} \quad (2)$$

式中: N_0 为统计波数。

3.4 波浪周期的模拟讨论

波浪模型试验中涉及最多的波浪周期有平均周期 T 和有效波周期 T_s ,设计标准或试验技术要求多数以平均周期 T 给出,同时规范规定 T_s 和 T 满足 $T_s = 1.15T$ 的关系,这个关系式是基于大量实测数据统计得到的。研究表明,就使用方便和代表的稳定性而言, T_s 要优于 T 。《规程》仅对 T_s 允许偏差做出规定,未提及 T 。

关于波浪周期的模拟,通常情况下要以 T_s 为准,这样会保证谱型和目标谱较好的拟合。 T_s 不同会导致试验谱和目标谱出现平移错位现象,无法满足《规程》规定的允许偏差要求。

因此在实际操作中,即使设计标准给出平均周期 T 值,依据波制作时也建议按照 $T_s = 1.15T$ 换算为 T_s ,再据 T_s 进行依据波制作。表2说明了试验波列中 T 和 T_s 并不精确满足公式关系,该案例中 $T_s \approx 1.05T$,此种情况应该按照试验 T_s 模拟。若以试验 T 和理论计算 T_s 模拟则出现谱型图的错位,见图3。

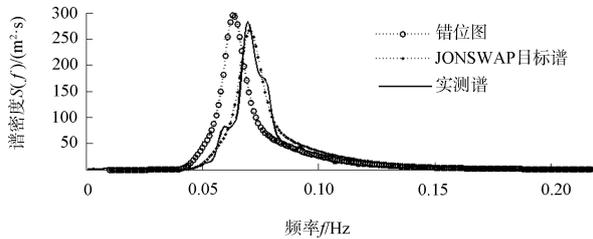


图 3 频谱拟合

4 推荐依据波模拟控制标准

针对不规则波的模拟, 首先需要根据试验目的和内容来选定需要准确控制的特征值, 建议参照表 1 实施。

关于不规则波波列统计分析方法选取, 基于前述部分大波平均值法的优势, 建议试验依据波制作时对短序列波列 (波数 100~150) 统计方法采用部分大波平均值法, 例如: 使试验波列 $H_{1/3}$ 值按照设计标准 $H_{13\%}$ 模拟。当然, 若实验室有条件进行模拟原型长序列波浪制作时, 仍可采用超值累积频率法进行统计分析, 但要注意组距和拟合曲线的合理选取。

对明确要求模拟设计标准 $H_{1\%}$ 波浪的情况, 依据波制作时, 可近似按照 H_{\max} 与设计标准 $H_{1\%}$ 相等原则控制。对未明确要求模拟设计标准 $H_{1\%}$ 的试验, 可参照公式(2)确定模拟的试验波列。

对于波列周期的模拟, 建议采用 T_s 作为控制标准, 即使设计标准给定平均周期 T , 仍需按照 $T_s = 1.15T$ 转换为 T_s , 以保证谱型的准确模拟。

5 结语

对单向不规则波的物理模拟关键问题进行了探讨, 提出了一套实用可行的波浪模拟控制标准, 主要包括: 1) 根据试验目的和内容来选定需要准确控制的波浪特征值; 2) 推荐采用部分大波平均值法统计试验波列; 3) 主要按试验波列最大波 H_{\max} 控制设计标准 $H_{1\%}$; 4) 按照 T_s 控制模拟波列周期。

参考文献:

- [1] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程 [S].
- [2] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2002.
- [3] 左其华. 水波相似与模拟[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [4] 邱大洪. 工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [5] JTS 145—2015 港口与航道水文规范 [S].
- [6] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2000(4): 549-556.
- [7] 左其华, 杨正己. 试验室波浪模拟若干问题[J]. 水利水运科学研究, 1993, 55(1): 33-44.
- [8] 俞聿修. 不规则波模型试验的几个问题[J]. 海洋工程, 1988(2): 37-44.
- [9] 刘思, 柳淑学, 李金宣, 等. 单向不规则波群的实验室模拟和分析[J]. 水道港口, 2011(5): 305-312.
- [10] Xu Delun, Hou Wei, Zhao Meng, et al. Statistical simulation of wave groups[J]. Applied Ocean Research, 1993, 15(4): 217-226. (本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

振华重工设备助力“长征七号”发射平台建设

2016-06-25T20:00, 我国为发射货运飞船而全新研制的运载火箭——长征七号在海南文昌航天发射中心实现首次发射升空。振华重工自主研发的航天活动发射平台转弯行走装置在火箭发射前的转运过程中发挥了重要作用。我国成为继美国、欧空局、日本之后第 4 个掌握“发射平台转弯行走技术”的国家。

长征七号在水平卸载间完成组装后, 需要从卸载间缓缓滑向 2.8 km 外的发射架火箭, 整个转场过程要拐 4 个 60° 的弯。航天系统配套工程对工程设施要求相当严格, 经过甄选, 最终振华重工凭借电控、液压等技术优势, 获得该航天活动发射平台转弯行走装置项目的订单, 滑板式行走装置作为中国运载火箭活动发射平台的重要组成部分, 在中国航天领域首次应用。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201606/t20160628_49004.html (2016-07-04)