



新型水槽造波机参数设计与特点

郑子龙¹, 王收军²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 港口水工建筑技术国家工程实验室, 天津 300456;
2. 天津理工大学, 天津 300384)

摘要: 在全球气候变化的背景下, 近年来经常出现极端波浪造成海岸工程的破坏。为重现破坏过程, 研究破坏机理, 解释大风浪下泥沙的起动与运动, 分析结构与地基在大浪作用下的耦合作用, 需要大尺度的波浪水槽进行试验研究, 以突破比尺效应的限制。新型水槽造波机是该水槽中重要的设备。通过分析我国波浪和工程特点, 对比应用需求, 得到造波机的主要设计参数。设计建设中的大比尺波浪试验水槽长450 m, 宽5 m, 深8~12 m, 建成后将是世界上尺度规模最大和造波能力最强的波浪试验水槽, 配套造波机的设计波高达到3.5 m。

关键词: 大比尺波浪水槽; 造波机; 功能设计; 功能指标

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0046-04

Parameters design and chief function of large-scale wave generator

ZHENG Zi-long¹, WANG Shou-jun²

(1. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China; 2. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Under the background of global climate change, it often appears the destruction of coastal structures caused by extreme waves. It is necessary to use the large-scale wave flume to reappear the destruction process, research the breaking mechanism, explain the sediment starting and movement under wind waves and analyze the coupling effect of the structure and foundation under big wave actions. The large-scale wave flume could break through the limitation of the scale effect. The wave generator of new wave flume is the most important equipment. According to the analysis of wave characteristics and requirement of the application, we obtain the design parameters for the wave generator. The wave flume designed and being under construction is 450 m long, 5 m wide, and 8 to 12 m deep. It will be the largest-scale wave flume with the strongest wave power in the world, and the design wave height would be 3.5 m.

Key words: large-scale wave flume; wave generator; functional design; objective function

大比尺波浪水槽作为国际领先水平的水运工程基础理论研究设施, 将被建设成为适应水运交通现代化要求、配置先进、功能齐全、资源共享的水运工程科技创新平台, 以及技术创新、重大技术突破、高层次人才培养和进行国际交流的基地。其应用前景主要为: 1) 控制模型比尺可最大限度的消除比尺效应的影响, 从而得到更为真

实的试验数据和试验现象, 进行基础理论研究, 为数学模型、理论分析提供依据。2) 根据近年来频现的恶劣天气产生的极端波浪对海岸工程造成的威胁, 利用大比尺波浪水槽, 可在实验室对结构进行破坏性试验, 检验块体、沉箱、胸墙等结构的安全性, 进一步根据不同结构的破坏形式分析破坏机理, 从而为防波堤的破坏评估提供依

收稿日期: 2013-12-27

作者简介: 郑子龙(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事港口工程方面的研究。

据。3) 防波堤在大浪作用下出现的严重越浪问题, 往往造成巨大的经济损失, 因此防波堤的越浪量不但是防波堤结构和断面设计的关键因素之一, 也是衡量防波堤防浪效果以及评价堤后安全的重要参数。为安全防护和防灾减灾提供依据。4) 可以模拟接近原体的泥沙问题, 从而探讨运动机理, 进行泥沙问题研究, 寻求减淤方法。5) 进行波浪与地基基础相互作用研究, 探索地基失效引起的建筑物破坏机理与改善措施。

要达到上述研究目的, 必须研制一台功能齐全的大型水槽造波机, 而这项工程是一项复杂的系统工程, 是一个多学科交叉应用体系, 它涉及海洋波浪、计算机、自动化、动力工程、机电传动、传感器技术、机械设计、先进制造技术等。其设计制作内容有: 计算机控制系统(含各种波谱的程序实现)、运动控制系统(含波高采集以实现吸收造波系统); 动力系统; 机械传动系统; 造波执行机构; 安全保护系统; 考虑应用环境的防腐措施或装置; 与土建设和施工单位的紧密配合, 实现无缝对接。本文就是针对大水槽造波机参数设计与技术指标响应进行阐述。

1 主要设计参数的确定

考虑我国设计的现有沉箱或半圆堤单节长度一般为 15~20 m, 对于模型比尺取较大的 1:5, 则在水槽中的宽度为 3~4 m, 考虑两端防护, 故将水槽宽度定为 5 m^[1]。水槽的深度沿程不同, 100 m 长的铺沙段深度为 12 m, 其他区域为 8 m。水槽的深度布置与日本 PARI 大水槽^[2]一致。水槽所需长度由下列因素决定: 造波时造波板背后的水域不至于使水溢出; 对周期较长的波来说, 前 1~3 个波会受到一定的影响, 造波时要启用缓起装置; 造波板的再反射会对实验结果产生影响, 所以水槽里必须保证一定的有效波数; 消波区要保证在一个波长以上。因此决定水槽长度的主要是有效试验波数和最大的波浪周期。

对于有效波数的确定, 根据日本 PARI 大水槽设计人员和研究人员介绍的经验, 日本 PARI 大水

槽受场地的限制长度只有 185 m^[3], 能够模拟长周期的波浪数太少, 有效波数只有 2 个, 研究波浪周期性荷载作用下软基液化时, 周期数太少, 物理过程体现难, 而且实验时间太短实验数据采集困难, 要较好地完成这类实验至少应该有 5 个完整的周期。对于最大波浪周期的确定, 常见的天然海浪参数见表 1, 对于模型比尺 1:1~1:5 的天然波浪各周期段对应的大水槽周期见表 2。

表 1 不同地区或波浪类型的海浪周期

地区或波浪类型	波高 $H_{1/100}$ /m	平均周期/s
渤海	4~7	5~11
黄海	4~9	5~13
东海	6~16	8~16
南海	6~14	10~16
韩国部分海域	6~16	8~20
印度洋北岸	6~12	10~20
海啸波	6~40	20~1 800

表 2 不同模型比尺对应的波浪周期 s

平均周期	有效周期	1:1 模型周期	1:3 模型周期	1:5 模型周期
6	6.9	6.9	4.0	3.1
10	11.5	11.5	6.6	5.1
14	16.1	16.1	9.3	7.2
18	20.7	20.7	12.0	9.3
22	25.3	25.3	14.6	11.3

根据表 1 和表 2, 如果单考虑中国天然海浪的特点, 若模型最大周期为 10 s, 则基本能满足现有工程的需求。对于较长周期的波浪, 可采用适当加大比尺模拟的方法实现。对于海啸波等特殊波浪的基础性研究, 考虑在模拟上采用专门的控制程序以实现单个波的模型。

综合以上所述, 在条件许可的前提下, 水槽越长越好。以水深 5 m, 周期 8 s 的规则波为例, 造波板背后约需要 20 m, 模型背后需要 50 m 过渡区, 消波区(水深变化的情况下)需要 40 m 长。当必要波数为 8 个(有效波数 5 个+缓起动的影晌 3 个)时, 造波板和模型之间的必要距离约为 200 m, 这种情况下水槽长至少需要 300 m; 对于

水深 5 m, 周期 10 s 的规则波, 水槽总长应该在 400 m 以上。因此, 本文所述的大水槽设计长度 450 m^[4] 可以很好地满足各种波浪模拟。

大水槽造波装置采用活塞式造波板^[5-7], 用电动机带动齿轮和齿条的驱动方式, 电动机采用交流伺服电机 (403 kW × 4 台)。造波板的前后都注水, 采用背面平衡方式。造波板的中心位置采用可移动方式, 背面距离取波长的 1/4 左右, 这样背面的水面只是上下移动, 造波板背面受力单纯, 受波能量影响较小。对于短周期的波浪来说, 由于所需造波能量不是很大, 因此允许背面造波, 但需设置消波装置。造波装置的最大冲程为 ±5 m, 采用位移控制, 并且可以利用造波板前面的波高计所采集的波高信息, 进行吸收式造波。

大水槽造波机设计造波板深 11 m, 宽 5 m, 可生成规则波和常见谱型的不规则波, 其设计造波能力为规则波最大波高 3.5 m, 波浪周期范围为 2 ~ 10 s。另外, 对于较长周期的海啸波、孤立波等, 可采用专门的控制程序实现。最终确定, 造波机的工作能够满足如下要求:

- 1) 推板式造波, 板高 11.0 m, 板宽 5.0 m, 最大水深 8.0 m;
- 2) 实现规则波, 最大波高不小于 3.5 m;
- 3) 实现规范谱、JONSWAP 谱、光易谱以及其它任意谱型的单方向不规则波;
- 4) 实现奇异波、孤立波和海啸波;
- 5) 造波最小周期不大于 0.5 s, 最大周期不小于 10.0 s;
- 6) 实现规则波和不规则波的吸收式造波, 有效波高 2.0 m 以下, 0.5 ~ 2.0 倍谱峰频率范围内吸收率不小于 80%。

2 造波机主要功能

大水槽造波机可以满足规则波和各种不规则波的造波要求, 系统中包括人机操作及参数输入环节, 运动控制环节, 伺服驱动环节和安全保护

环节等部分。

2.1 工程师站

在控制系统中设立一个工程师站, 负责完成造波参数的设定和造波系统的控制。在每次造波过程中由于所用参数不同, 所以在试验开始前, 须输入本次试验所需要的参数, 包括波高、周期、波个数、水深、造波类型、本次造波零点位置等, 这些参数可以以文件的形式保存在计算机中, 方便以后进行同样参数的试验时使用。

2.2 不规则波造波控制

在水槽中实现不规则波的模拟^[8-9], 需要在工程师站中根据设定的参数结合相应的谱型计算出造波需要的波面序列数据, 然后将数据发送给运动控制器, 由控制器将水面波序列数据转换成伺服电机驱动数据, 控制伺服系统运动, 驱动推波板完成造波过程。大水槽造波机可以实现多种不规则波的模拟, 包括 P-M 谱、光易谱 (B-M 谱)、JONSWAP 谱、Wallops 谱、规范谱等多种波谱, 控制程序中还留有数据接口允许用户根据需要定义波谱。

2.3 实现海啸波的控制

海啸波是一种长周期海浪^[10], 由一连串波高大小不等的波列组成, 通常情况是较大的首波峰后面跟着一系列较小的波峰。典型的海啸波周期通常为 60 min 左右, 在此周期下水深 40 m 的海啸波波长大约 7.2 km, 波长远远大于水深。另外, 海啸可以传播几千公里而能量损失很小。从理论上讲, 孤立波的波长是无限的, 孤立波 90% 的水体体积和能量都集中在峰顶附近。因此根据这些特性, 在实验室中可以采用孤立波来模拟海啸首波峰。在实验室波浪水槽生成典型海啸波断面常用方法有 2 种——孤立波法和水表面衰减法。

2.4 实现试验段目标波浪的造波方法

大水槽造波机进行试验时, 首先根据设定参数计算出水面波序列数据, 然后由运动控制器控制伺服系统驱动推波板完成造波过程。此时波浪

在水槽中运动, 到达试验段时, 受水槽条件 (池壁摩擦力、升波段位置、角度等) 及试验模型等多种因素的影响, 实测的波浪要素与目标波浪要素之间产生一定的误差。为了消除误差对试验的影响, 需要在试验段目标位置设置波高检测传感器, 测出实际的波浪要素, 结合目标参数进行分析计算, 然后用计算后的结果修正造波过程数据, 再次进行试验。如此反复几次就可以得到符合要求的试验结果。一般情况下, 经过修整后, 重复 2~3 次就可以得到比较理想的数据结果。试验开始时, 首先由工程师站根据设定参数计算出造波过程的水面波序列数据, 同时计算出波浪传递到试验段波浪采集位置的时间, 并通知采集系统准备工作, 这样可以保证造波和采集系统工作同步进行。

大水槽造波机采用伺服电机作为驱动单元, 由于伺服电机的响应速度快、控制精度高, 因此在造波过程中不会产生信号的滞后和误差, 在数据分析过程中, 可以不考虑伺服系统对造波过程产生消极影响。

在对试验段采集的实测数据进行分析后, 可以得出实测的波高, 周期等数据。如果目标波为规则波, 则修正方法十分简单, 将实测波高与目标波高进行比较, 计算出偏差, 对偏差进行修正后, 叠加在目标波高中, 再次进行试验, 基本上就可以实现目标造波要求。

如果目标波是不规则波, 则修正时还要考虑谱峰和谱面积等参数的偏差, 在进行修正时, 要对波长、谱峰、造波水力传递函数等参数进行修正, 经过综合计算最后得出修正参数, 计算出新的水面波序列数据, 进行新的试验过程。从其他水槽造波机的工作过程看, 现有的修正算法能够保证在 2~3 次的修正过程中实现良好的造波效果, 满足试验要求。

2.5 大水槽造波机的造波能力

在水槽造波机电机总功率固定的条件下, 产生固定的总推力, 用总推力来引导计算可以得出造波机的造波能力曲线 (图 1)。

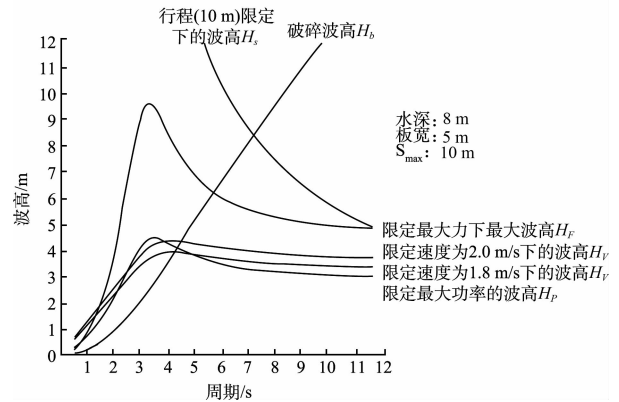


图 1 水深 8 m 时造波机各项能力曲线

曲线说明: 破碎波高 H_b ; 行程 (10 m) 限定下的波高 H_s ; 在限定最大力下可实现的最大波高 H_F (左上方曲线); 限定速度为 1.8 m/s 下的波高 H_v ; 限定速度为 2.0 m/s 下的波高 H_v ; 限定最大功率的波高 H_p ; S_{max} 为造波板最大行程。

3 结语

1) 正在建设中的大比尺波浪试验水槽, 其大型水槽造波机是首次由国内大学和科研机构结合中国天然海浪的特点自主设计、制造。

2) 该水槽建成后将成为世界上尺度最大和造波能力最强的波浪试验水槽, 板高 11.0 m, 板宽 5.0 m, 最大水深 8.0 m, 可实现最大波高不小于 3.5 m, 造波最小周期不大于 0.5 s, 最大周期不小于 10.0 s。

3) 大水槽造波机可以实现规则波和各种不规则波的造波要求, 包括规范谱、JONSWAP 谱、光易谱等多种波谱, 以及留有允许用户根据需要定义波谱的数据接口。

4) 大水槽造波机造波方法简单而精确, 响应速度快, 控制精度高, 能够良好地满足试验要求。

作为国际领先水平的水运工程基础理论研究设施, 建成后的大型波浪试验水槽将成为适应水运交通现代化要求、配置先进、功能齐全、资源共享的水运工程科技创新平台, 以及技术创新、重大技术突破、高层次人才培养和进行国际交流的科研基地。