

港海专业实验讲义

大连理工大学土木水利实验教学中心

港口航道与海岸工程实验室

2010 年 9 月

概 述

港口、海洋工程建筑物一般位于近海地区，经常受到波浪、水流等海岸动力因素的作用。因此，在港口建设中规划其平面布置、设计各种海洋工程建筑物、防浪建筑物时，都必须掌握海洋动力因素的变化规律，预计可能发生的对建筑物的作用力。

研究解决此类问题，一般采用数学模型和物理模型两种方法。所谓数学模型是将描写原体各量的关系数学表达式，进行数学计算的一种方法，它与物理模型相比，设备简单，变换条件容易，节省人力和经费等优势；但由于有些实际工程问题，所涉及到的自然现象和边界条件比较复杂，由此带来的计算技术方面的问题是相当困难和复杂的，有时甚至一时无法计算。而物理模型则不同，它是将原型有关的动力因素，根据相似原理，通过比尺的缩小，使原型有关现象在模型中复演，比较直观，以便进行研究。

一、模型试验的目的

港口、海洋建设工程设计时，常产生一些问题，因在理论研究时，不可能完全考虑复杂和多变的自然条件，所以在海岸建筑物的总体布置及建筑物的结构设计中，常用实验室和现场实验的方法对某些问题进行研究。通过模型试验可以解决下列问题：

1. 对于难以计算的问题，提供设计依据

生产、设计和科研中提出的一系列问题，有许多问题现在还不能用计算分析的方法解决，而必须用模型试验的方法，为设计提供依据。

2. 验证应用理论的正确性

港口、海洋工程中的某些问题，可以用有关的理论来求解，但为了验证该理论在某问题中的应用是否合适，可以用模型试验来验证，以直观的看出是否合适。

3. 寻找规律，发现理论的解答

通过模型试验对自然界中所发生的各种现象进行研究，将各种试验资料累积总结，人们就进一步掌握客观规律。如在防波堤等建筑物的波浪力计算中，所提供的半理论经验公式，就是通过大量的试验资料分析而得。

4. 配合数值计算解决问题

港口、海洋工程中的问题，有些可以应用计算机通过数值计算予以解决，但计算中的某些参数，有时又难于确定，这样可通过物理模型试验确定有关参数，供数值计算时应用。

另外，数值计算中的边界条件，可由物理模型试验提供，如各种边坡的反射系数等。在应用物理模型与数学模型共同解决某一问题时，也可由数值计算给物理模型试验提供边界条件。

总之，港口、海洋工程的模型试验为生产的发展和科学研究提供了依据，但我们也应看到模型试验也有它的局限性，如做较大海湾的整体模型试验，考虑到水本身的特性及比尺效应的影响，模型比尺不能取得太小，若取用合适比例则水池可能放不下，这时就要考虑与数值计算相匹配合来进行研究。因此有些问题的研究，需要物理模型、数值计算和现场观测相结合，才能使问题得到圆满解决。

二、模型试验的种类

根据试验任务不同，可选用不同的模型来满足试验要求。

1. 整体、半整体模型试验

当我们研究港内波浪状况时，需要把研究的港区地形、码头和防波堤等建筑物都按比例缩小，做成模型进行试验，这种模型试验叫整体模型试验。

如果建筑物是对称的，我们就采用半整体进行模型试验，这种模型试验称半整体模型试验。

2. 断面模型试验

有些问题往往不需要整体模型，例如测防波堤上的波压力或块体的稳定性，模型比尺不能取得太小，此时只要沿防波堤轴线截取一段进行试验即可，这种模型试验叫断面模型试验。

3. 正态、变态模型试验

在一般问题的试验时，对原型的三个尺度都用相同的比例尺来缩小成模型，这样的模型试验叫正态模型试验。但有些情况因受一些条件的限制，正态模型不能满足试验要求，而采用变态模型，变态模型试验在竖向和水平方向的长度缩小倍数是不同的。

4. 动床、定床试验

另外还有根据试验模型底床的变化与否，分为动床试验和定床试验。定床试验是指在整个试验中底床始终不变，动床试验则与之相反，在研究泥沙运动时多用此方法进行试验。

三、试验用的主要设备

港口、海洋工程结构物的水力模型试验，其基础设施和设备是造波系统、造流系统、波浪水槽和水池等。

1. 造波机

按照波浪生成方法，目前，机械式造波机是较常采用的一种造波系统。机械式造波机采用机械传动机构，扰动水体产生波浪，能较好地模拟规则波和不规则波。机械式造波机可分为三种：变速电机与偏心轮驱动方式、液压式驱动方式和电机驱动方式。

变速电机与偏心轮驱动方式为：电机变速后带动偏心轮和连杆机构，推动造

波板，产生波浪。一般通过改变电机转速来实现改变周期，改变波高通过调整偏心距来实现。

液压式驱动方式为：液压式造波机将高压油通过液压缸，控制液压缸的推动冲程和频率推动造波板产生波浪。液压式造波机一般利用电信号，通过改变一个或若干个阀门的开启过程，来改变液流的流量、流向、总量等，达到改变周期和波高的目的。

2. 波浪水槽和水池

波浪水槽一般由造波机、消浪设备、造流系统和水库组成，主要用于断面模型试验，可以同时模拟波浪、流。波浪水槽加流系统只在水槽的前后端设出口，只有与波浪方向相同或相反的流向。水槽的首尾两端设有消能设备，尾部消能设备能防止波流产生的反射波，并应采取措施消除或减小造波机的二次反射的影响。水槽宽度为0.5~3m，水槽长度为30~70m或更长，水槽中的水深一般为0.3~1.2m。图1为港口航道与海岸工程实验室波浪水槽。



图1 波浪水槽

波浪水池一般由造波机、消浪设备、造流设备组成，主要用于整体模型试验研究。它们的面积大小和高度，取决于研究的海岸区域范围大小、问题性质、选取的模型比尺以及测试要求的精度等。波浪水池长度应大于10倍波长，一般为30~60m，水池宽度为15~40m。水池首尾应设消浪装置，有斜向波反射时，水池的两侧应设消浪装置。图2为港口航道与海岸工程实验室波浪水池。

造波机安放在港池、水槽的前端，作为人工模拟波浪，进行港口平面布置、泊稳和海岸工程水工建筑物等试验必须具有的实验室基本设备。在港池、水槽的尾部还设有沉沙池，以拦截泥沙冲刷试验波流带来的泥沙。



图 2 波浪水池

四、试验用的主要仪器

1. 水面波动的测量

在海岸工程试验中，进行水面波动即波高测量是必不可少的。一般使用变参数式传感器来测量，测量波高的传感器主要有电阻式和电容式浪高仪两种。电阻式传感器由于传感器的两个电极，在水中易于极化，测试时间较长时，率定系数发生变化，所测波高参数就不稳定。因此目前多使用电容式浪高仪。

《CBY-II 型波高测量控制系统》（图 3）是采用先进的电子技术、传感技术和计算机硬、软件技术最新研制成功的计算机多点同步测量系统，系统可实时同步采集处理 30 点波高，测量精度高，并设计有先进的硬件调零功能和放大倍数调节功能。

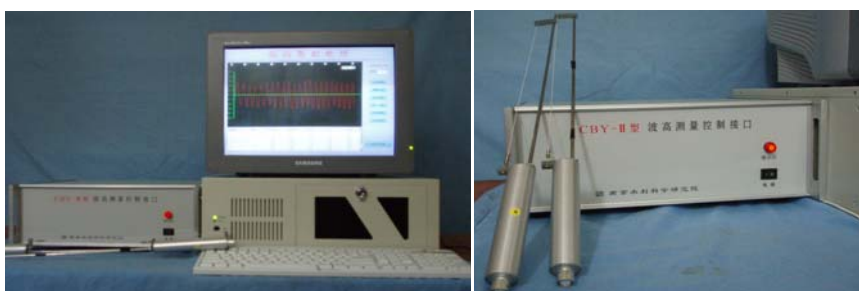


图 3 CBY-II 型波高测量控制系统

测量系统软件界面（图 4）设计为按钮控制的主菜单模式，具有常系数建立、传感器自检、零点测量、浪高测量、浪高处理、流速测量等功能，系统功能丰富，使用简单方便，界面美观新颖，具有很强的可视性和交互性。测量系统具有丰富的自检自诊断功能，可以静态地检测每路传感器的输出信号，还可以动态地检测和显示每路测量数据和跟踪曲线。

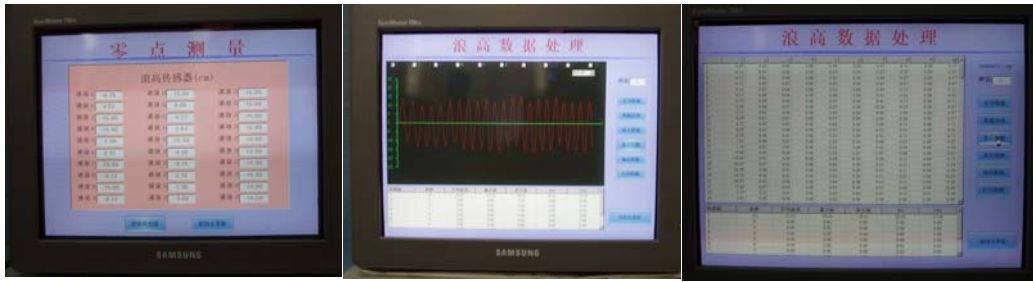


图 4 测量系统零点测量界面和数据处理界面

数据采集时可以根据试验的要求，选择不同的通道数、每秒钟采集次数和采样时间，测量数据经处理和统计后可以分别显示每路传感器在设定采样时间内测量的平均波高、波数、最大波、次大波、4%大波和 13%大波等，也可以分别显示每路传感器测量的数据和曲线图像，曲线图像可根据试验需要，选择单路或多路显示，也可放大 1~7 倍显示。在浪高数据处理中，有阈值设定和调节功能，可根据浪高数据测量和处理的需要，设定不同的阈值。

2. 力的测量

在海岸工程试验中，为探求水力因素与建筑物相互作用，需进行力的测量。测力方法可以分为机械式测力机构和电子测力系统，在海上动力因素研究中，主要采用电子测力系统。

电子测力系统一般包括三部分：测力传感器、放大器及调平部分即动态电阻应变仪、记录仪器。

目前采用先进的电子技术、传感技术、计算机集一体的测力系统很多。《CSW-II 型压强和总力测量系统》（图 5）是采用先进的电子技术、传感技术和计算机硬、软件技术最新研制成功的计算机多点同步测量系统，系统可同步采集处理 27 点压强（也可扩充同步采集 81 点压强）和 27 点总力，系统设计有先进的硬件调零功能和硬件放大倍数调节功能。



图 5 CSW-II 型压强和总力测量系统

测量系统软件界面设计为按钮控制的主菜单模式，具有常系数建立、传感器自检、零点测量、压力测量、压力处理、总力测量、总力处理等功能，界面美观新颖，具有很强的可视性和交互性（见图 6）。

测量系统具有丰富的自检自诊断功能,可以静态地检测每路传感器的输出信号,也可以动态地检测和显示每路测量信号的数据和跟踪曲线。数据采集时可以根据试验的要求,选择不同的通道数、每秒钟采集次数和采样时间,测量数据经拟合平滑处理后显示处理前后的数据和多路曲线图像。曲线图像可根据试验需要,选择单路或多路显示,也可放大1~7倍显示。



图6 测量系统软件界面

3. 流速测量

流速测量对研究流体中流速场的分布有着重要意义。在研究波浪与水流共同作用时,也需要进行流速测量,研究防波堤或码头前沿护底的冲刷时,也要进行流速测量。下面将在海岸工程模型试验中常用的几种测流速方法做一介绍。

(一) 浮体追迹法

(1) 表面浮子法

用于测水面流速。将纸屑或塑料粒(轻于水)放在水面上,测出流动的距离 Δs 和所需时间 Δt ,则流速为 $u = \Delta s / \Delta t$,可以用眼看,摄影和录像等方法记录 Δs 和 Δt 。

(2) 浮粒子法

用于水流流速不太高的试验中,在玻璃水槽中测底流速。要求浮子的比重必须与水相近,而其色泽又区别于水,一般浮子可以用石蜡和橡皮泥混合做成,石蜡比重小于1,橡皮泥比重大于1,做成小球,水流动时小球移动,用目测或摄影记录小球移动距离 s ,所需时间 t 用秒表记或按波浪周期计算,则底流速 $u = s / t$ 。

(二) 热线—热膜流速仪

热线—热膜流速仪的工作原理是利用热电阻传感器的热损失来测量流速,测量时将传感器置于流场中,流体使其冷却,利用传感器的瞬时热损失来测出流场的瞬时速度。热线是由电阻温度系数很高的钨、铂合成等材料制成,热膜则是在石英丝或其它测器表面上镀一层金属(如铂)膜作为热电阻,金属通电后被加热,该体流动的强迫对流引起热损耗使之冷却,电阻发生变化,流速越大,线电阻变

化越大。测出线电阻的变化，就可求得流速的大小。

热线—热膜流速仪它的传感器小，对流场干扰不大，而且灵敏度高，对流速脉动的频率响应高，能同时测出多维速度分量。但它对水质有较高的要求，必须清洁无杂质，否则由于杂质沉淀在传感器表面，则造成测量误差。

（三）旋浆流速仪

目前旋浆流速仪品种较多，水力试验中用的也较广。《LGY—III型多功能智能流速仪》是采用先进的电子技术、传感技术和计算机硬、软件技术最新研制成功的一种多功能智能流速仪，内置 CPU 微处理器、存储器等，具有自检自诊断功能；流速仪分为 8 路仪器和 12 路仪器两种，可根据实际需要选择，并随机配套 8 根和 12 根新型流速旋浆传感器。流速仪可同步采集多点流速；可作为单机独立工作，也可通过本机上的通讯接口与计算机连接，计算机可以控制单台或多台多功能智能流速仪同步采集与处理，程序设计了动态的音视频效果。LGY—III型多功能智能流速仪配置了触摸式键盘，8 位 LED 显示，性能好，精度高，寿命长，抗干扰能力强。流速测量范围：1~200cm/s。



图 7 LGY—III型多功能智能流速仪

该传感器是采用先进的技术研制而成，旋浆螺旋角、螺距、制作工艺和材料等都进行了重新设计，旋浆直径分别为 $\Phi 15\text{mm}$ 和 $\Phi 12\text{mm}$ （旋浆反光面采用先进的电镀工艺，耐磨损，信号强），起动流速 $\leq 1\text{cm/s}$ ，起动流速、测速范围、线性度、同心度和均方差等指标均较以往传感器有很大的改进和提高。

（四）声学多普勒流速仪

20 世纪 70 年代随着集成电路 IC 技术的迅速发展，声学多普勒流速仪得到实际应用，如今已广泛应用于水力及海洋实验室的流速测量。

声学多普勒流速仪能直接测量三维流速，对水流干扰小、测量精度高、无需率定、操作简便、流速资料后处理功能强，极具推广应用前景。声学多普勒流速仪一般由传感器、信号调理、信号处理三个部分组成。传感器由 3 个 10MHz 的接收探头和一个发射探头组成，3 个接收探头分布在发射探头轴线的周围，它们之间的夹角为 120° ，接收探头与采样体的连线与发射探头轴线之间的夹角为 30° ，采样体位于探头下方 5cm，这样可以基本上消除探头对水流的干扰。图 8 为超声

多普勒流速仪传感器工作原理图，图 9 为 NorTek 的 ADV 探头。

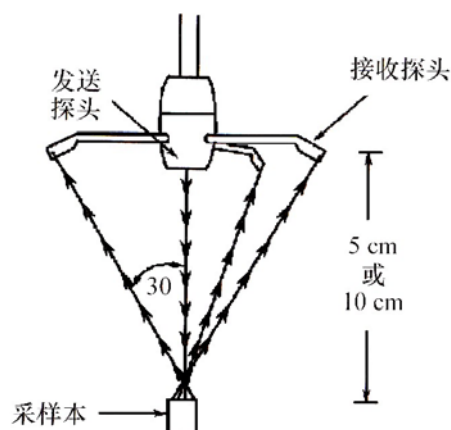


图 8 超声多普勒流速仪传感器工作原理图



图 9 NorTek 的 ADV 探头

五、海岸工程水力模型试验要求

1. 对整体模型试验的要求

港口、海洋工程整体模型试验一般用于测得港内波况和停靠在码头上的船舶运动、海洋工程结构物（如钻井平台）的波浪力、冲刷等试验研究。试验宜在室内水池进行，当在室外进行时，应避免风引起的涟漪或小重力波产生的影响。

整体模型试验应采用正态模型，模型比尺不应小于 1:150。放置船模时，模型比尺不应小于 1:100。模型原始波高不宜小于 2cm，波周期必须大于 0.5s

整体模型试验需对海岸地形进行模拟，制作地形时，一般用等高线法或断面法控制高程，控制点的高程误差不应大于 $\pm 1.0\text{mm}$ ，用水泥砂浆抹面后的地形高程误差不应大于 $\pm 2.0\text{mm}$ 。

建筑物模型可用金属、木材、塑料、有机玻璃、水泥砂浆等材料制作，模型浸水后不变形，其尺度误差不应大于 $\pm 1.0\text{mm}$ 。

在选择模型比尺或放置模型时，应注意边界条件的影响，要求造波板与建筑物模型间的距离不应小于 6 倍波长，防波堤堤头与水池边界间的距离宜大于 5 倍波长，若条件不允许，也不应小于 3 倍波长，并应在边界放置消能装置，以减

少反射波的影响。

测波点一般设在码头前 0.5 倍船宽处，每个泊位不应少于 1 点，测点间距不应小于 20cm。原始波在各控制点的波高平均值与模型试验要求的波高值间的误差不应大于 5%。

港内平稳度一般用比波高或绝对波高表示。比波高为港内各测点实测波高与口门处实测波高的比值。

2. 对斜坡堤断面模型试验的要求

斜坡堤断面试验应采用正态模型，模型比尺不应小于 1:40。造波板与建筑物模型间的距离不应小于 6 倍波长。

试验断面的护面块体和胸墙模型的几何尺寸、总重和重心位置等均应与原型相似，其尺度误差不应大于 $\pm 1.0\text{mm}$ ，重量误差不应大于 $\pm 3\%$ 。

规则波的模型试验应采用间断造波的方法，当二次反射波到达建筑物前应立即停止测试，待水面平稳后，再进行造波，对无缓启动和缓停机功能的造波机，应注意排除启动和停机产生的个别大波的影响。

护面块体和块体的整体稳定试验，应先用小波连续作用一段时间，待其自然稳定后，再加大到设计波高进行正式试验。波浪累积作用时间应根据当地大浪持续时间（一般为 2~3 小时）按时间比尺换算确定。护面块体单位面积抛放数应符合设计要求，抛放条件应尽量于现场相符。在波浪作用下，护面块体的累积位移达到块体的最大尺度时，即为失稳。护面块体的失稳率，一般按静水位上，下一个波高范围内的失稳块数占该范围护面块体总数的百分比计算。失稳率超过规定的容许失稳率时，即认为护面已破坏。

测定胸墙墙面波压力和底面浮托力分布，其测点数应根据胸墙尺度确定。也可根据试验要求，只测其总压力和总浮托力。

斜坡堤的反射波高和反射系数可根据建筑物前实测的合成波高和标定的原始波高算出，也可直接根据波腹和波节点的波高实测数据通过计算求得。

3. 对直立堤断面模型试验的要求

模型可用金属、木材、有机玻璃等材料制作，模型比尺不应小于 1:40，模型在水槽中放置位置应满足距造波板的距离大于 6 倍波长的要求。

直立堤的模型设计、制作和尺度误差以及波浪作用时间，均可按斜坡堤断面模型试验要求进行。

直立堤断面模型试验的主要内容是墙面波压力分布、底面浮托力分布或总波压力，总浮托力以及堤前波浪反射系数、过水量、底冲刷等内容。有时也进行直立堤的整体或局部的稳定试验。

规则波的波浪力试验，应测定累计 30 个以上的数据并取其平均值，但对冲击波压力，除给出平均值外，尚应统计 1/3 大值、1/10 大值和最大值等特征值。

4. 对桩、墩式建筑物模型试验的要求

波浪与桩、墩式建筑物的相互作用，一般按重力相似模拟。模型比尺不应小于 1:60。桩模型应具有足够的刚度（考虑弹性相似者除外）和平直度，断面尺度误差不应小于 $\pm 0.2\text{mm}$ ，必要时模拟桩的表面糙率。墩断面的尺度误差不应大于 $\pm 1\%$ 。测力模型宜用轻质刚劲的材料制作。

模型距波高仪或槽壁的距离不宜小于 3 倍桩、墩直径或 4 倍垂直于波向的桩、墩宽度且不应小于 15 厘米。

测力系统的自振频率，宜大于被测波高频率的 4~6 倍。

桩式建筑物一般测定桩所受的正向水平力，必要时测定作用于桩上的横向水平力和对上部梁板的上拱力。墩式建筑物一般测定墩所受的正向水平力、浮托力和倾覆力矩。对重力墩式建筑物，应对基床护面的稳定性和底部的冲刷情况进行观察，并根据需要确定护底的范围和尺度。

5. 对浮式建筑物模型试验的要求

波浪与浮式建筑物相互作用的模型应采用正态模型，模型比尺不宜小于 1:80。

浮式建筑物应按重力相似模拟，应满足几何相似、重量相似、重心相似、质量惯性矩相似和自振周期相似等。重心的模拟误差不应大于 $\pm 1.0\text{mm}$ ，重量的模拟误差不应大于 $\pm 0.5\%$ ，自振周期的模拟误差不应大于 $\pm 2\%$ 。

浮式建筑物与池壁的距离 S 一般要求：

$$\text{圆形结构} \quad S = 3D \quad (1)$$

D —浮式建筑物的直径；

$$\text{非圆形结构} \quad B/L \leq 0.2 \text{ 时} \quad S = 4B$$

$$B/L > 0.2 \text{ 时} \quad S = 3L$$

其中 B —浮体长度在波峰线上的投影； L —波长。

当不能满足上述距离要求时，应对池壁边界进行消波处理。

锚系结构的模型与原型间应满足长度相似、重量相似和弹性相似。

模型锚链的弹性相似应按下式模拟：

$$\Delta L = P \cdot L / (EA)_m \quad (2)$$

$$(EA)_m = (EA)_p / \lambda^3 \quad (3)$$

$$(EA)_p = \frac{1}{2} E e \pi d^2 \quad (4)$$

式中 ΔL —模型链伸长 (mm)；

P —模型锚链拉力 (N)；

L —模型锚链长度 (mm)；

$(EA)_m$ —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_e —原型锚链的有效弹性模量 (N/cm²)；

d —原型锚环杆的直径 (cm)

模型缆绳弹性相似可按下式模拟：

$$T_e = C_e d^2 \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^n / \lambda^3 \quad (5)$$

式中 T_e —模型缆绳拉力 (N)；

C_e —原型缆绳弹性常数，当无实测数据时，钢缆取 2.697×10^7

(N/cm²)，尼龙缆取 1.540×10^6 (N/cm²)；

d —原型缆绳直径 (cm)；

$\Delta S / S$ —原型缆绳相对伸长；

n —指数，钢缆 $n = 3/2$ ，尼龙缆 $n = 3$ 。

模型缆绳重量相似可按下式模拟：

$$W = C_a d^2 / \lambda^2 \quad (6)$$

式中 W —模型缆绳单位长度质量 (kg/cm)；

C_a —空气中缆重比例系数，钢缆取 0.367 (kg/cm²/m)。

模型外形的精度主要考虑加工能力，小尺度模型一般为 1%，大尺度模型一般为 $\pm 0.5\%$ ，但不应大于 $\pm 0.5\text{mm}$ 。模型表面应光滑，入水后应不渗水、不变形。浮式建筑物的透浪系数 K_f 应按下式计算：

$$K_f = H_t / H_i \quad (7)$$

式中 H_i —入射波高；

H_t —透过波高（包括绕射波和浮体兴波），取浮体背波侧最近的波稳定。浮式建筑物的反射系数 K_r 应按下式计算：

$$K_r = H_r / H_i \quad (8)$$

式中 H_r —反射波高（包括浮体兴波），取浮体迎浪侧的反射波高。可用两点法。多点法或腹点法测出。

根据试验要求可分别测定浮体的横摇、纵摇、回转、横移、纵移、升沉等位移量。测浮体线位移的仪器应放在浮体的重心处。测浮体角位移的仪器其转动轴应与浮体的转动轴平行，否则应进行修正。仪器的设置应尽量不影响浮体的运动和受力。测链、缆受力的拉力计一般放在靠浮体一端，系缆点应与原型相似。

锚链和缆绳拉力一般采用悬臂钢片或测力环测定。

实验一 大直径圆筒结构波浪力物理模型试验

一、波浪对大圆筒的作用力

在海洋工程中，如大直径墩柱式码头结构物、海上各种钻井平台，在设计波浪荷载作用下，基础和支撑结构都承受着强度相当大的波浪作用力。所以波浪力是作用在海洋结构物上一项主要外力。波浪对海洋结构物的作用主要有以下四种效应。

1. 由于流体（海水）的粘滞性而引起的粘滞效应；
2. 由于流体的惯性以及结构物的存在，使结构物周围的波动场的速度分布发生改变而引起的附加质量效应；
3. 由于结构物本身对入射波浪的散射作用而产生的散射效应；
4. 由于结构物本身的相对高度较大，结构物与自由表面接近扰动了原波动场的自由表面而产生的自由表面效应。散射效应和自由表面效应总称绕射效应。

对于结构物尺度相对于波长比值的增大，结构物本身的存在对波浪运动有显著影响，对入射波浪的散射效应以及自由表面效应必须加以考虑。所以对海洋建筑物上的波浪力，一般依据结构物尺度是否对波浪运动有显著影响，将问题分为与波长相比尺度较小和较大的两类来分别考虑。对于相对尺度大于 0.2（结构物的特征尺寸与波长之比）海洋结构物（如大直径墩柱式码头结构物、海上钻井平台等）由于结构物的存在对波动场有显著影响，故对入射波浪的散射效应以及自由表面效应必须考虑。

大圆筒结构受力特点是以面力为主而弯曲应力较小，结构形式简单，材料用量省，工程造价低，受力合理，适用于软土地基，承载力高、耐久性好、对超载及工艺变化适应能力强。但同时其也存在如下缺点：需要具备一定的施工条件；基床应力较大；连续圆筒与土相互作用机理复杂，目前尚无被广泛接受的结构稳定性分析方法，也无规范或标准可循；连续圆筒的下沉方法和施工工艺等，都有待改进和提高。

目前关于波浪力的研究成果大多针对平直墙面建筑物，而作用于连续圆筒上波浪力的大小和分布，与平直墙面上波浪力的异同，以及其实用计算方法都尚未解决。正是由于这些设计理论、计算方法和工程施工等问题，曾出现过倾覆破坏、位移过大等工程问题。故连续圆筒结构波浪力试验研究，旨在进一步深入研究大圆筒结构的工程应用提供借鉴和参考。

二、实验目的

通过某护岸工程断面物模试验，观察堤前波浪形态，了解直立堤护岸在波浪作用下的整体稳定性，测试连续圆筒结构的波浪力，胸墙波浪力分布。使学生能够掌握在波浪力作用下，连续大圆筒结构物波浪力的测试方法，研究各种波浪作用下连续圆筒防波堤的波浪力特性，通过拟合给出圆柱堤墙上波浪力的简化公式

$$T : 10.0s$$

(3) 水深

依据海床高程： -14.0 m

极端高水位水深： 17.79 m

设计高水位水深： 16.97 m

设计低水位水深： 14.27 m

2. 试验方法

(1) 试验比尺的确定

试验依据规范《波浪模型试验规程》(JTJ/T234—2001)。根据弗劳德重力相似准则及实验室现有设备条件，试验模型的几何比尺定为 1:37.5。

长度比尺： $\lambda = 37.5$

时间比尺： $\lambda_t = \lambda^{1/2} = 37.5^{1/2}$

重量比尺： $\lambda_F = \lambda^3 = 37.5^3$

原型设计参数值与试验参数值换算见表 1。原型参数值与试验参数值换算 ($\lambda = 37.5$)

表 1 试验中其他有关参数

试验参数值		原型值	模型值
设计低水位 (+0.27m) 水深		14.27m	38.1cm
设计高水位 (+2.97m) 水深		16.97m	45.3cm
极端高水位 (+3.79m) 水深		17.79m	47.4cm
五十年一遇的波浪波高 $H_{13\%}$	设计低水位	4.46m	11.9cm
	设计高水位	4.9m	13.1cm
	极端高水位	5.1m	13.6cm
百年一遇的波高 $H_{13\%}$	设计低水位	6.0m	16.0cm
	设计高水位	6.0m	16.0cm
	极端高水位	6.0m	16.0cm
S 向波浪周期 T		9.0s	1.69s
SE 向波浪周期 T		10.0s	1.88s
护底块石		200~300kg	3.8g~5.7g
基床块石		10~100kg	0.2g~1.9g

(2) 试验模型的确定

试验模型采用正态模型，保证外形几何尺寸和重心及重量与原形相似，堤心石的级配满足规范要求。护底块石经过筛选，重量偏差控制在规范要求范围±3%

之内。人工护面块体、胸墙的模拟保证外形几何尺寸相似、重量相似及重心相似。

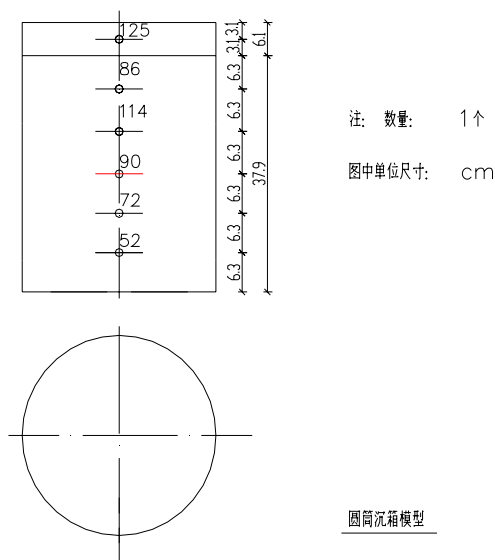
(1) 波浪水槽

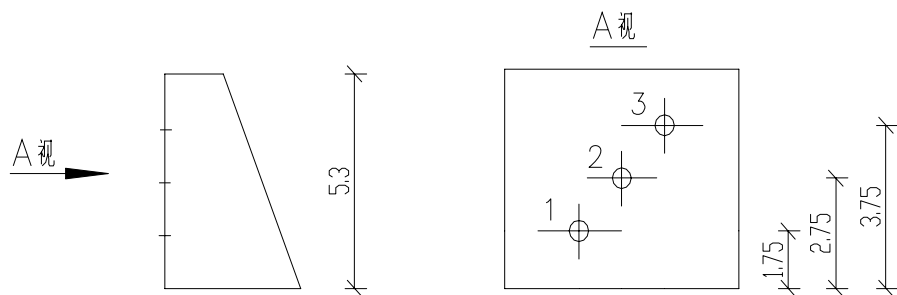
(2) 造波机

(3) 仪器

试验中造波系统、波浪测试控制系统有波高传感器、《浪高应变滤波多测试仪》、《造波控制仪》、造波控制软件、计算机组成。

四、实验内容





浆砌块石挡墙模型(单位: cm)

图 3 胸墙压力盒布置图 (图中尺寸单位以厘米计)

该试验模型采用正态模型, 保证外形几何尺寸及重量与原形直立堤相似。试验中给出的值 (试验水深、波高、周期) 均为模型值。因此试验中的实测值、理论计算值均按模型值取值。

在试验前 (没有安放模型时), 在预测处按模型试验要求的水深将波浪要素测好, 测好的波要素以文件形式存放计算机内以便试验时调用。

五、试验报告内容与要求

1. 试验目的。
2. 列出该试验中所用设备、仪器有哪些以及它们的作用是什么?
3. 该试验的模型比尺是根据什么确定的?
4. 在护岸断面稳定试验中, 将你观测、记录的试验结果填入表 2 中。
5. 利用试验时的压力值 (要求画出压力图), 计算波浪力, 并与理论值比较。同时验算某一水位下的护岸结构的稳定性 (抗滑与抗倾), 要求有详细的计算步骤。

表 2 试验结果汇总表

水 位	波浪要素	护底块石 稳定情况	胸墙的爬坡高 度	胸墙的爬坡长 度
设计 低水位 +0.27m	$H_{13\%}=4.46\text{m}$ $T=9.0\text{s}$			
	$H_{13\%}=6.0\text{m}$ $T=10.0\text{s}$			

设计 高水位 +2.97m	$H_{13\%}=4.9\text{m}$ $T=9.0\text{s}$			
	$H_{13\%}=6.0\text{m}$ $T=10.0\text{s}$			
极端 高水位 +3.79m	$H_{13\%}=5.1\text{m}$ $T=9.0\text{s}$			
	$H_{13\%}=6.0\text{m}$ $T=10.0\text{s}$			

表 3 波浪作用下圆筒墙上的波压力

墙身名	压力号	设计低水位		设计高水位		极端高水位	
		$H_{13\%}=4.46\text{m}$ $T=9.0\text{s}$	$H_{13\%}=6.0\text{m}$ $T=10.0\text{s}$	$H_{13\%}=4.9\text{m}$ $T=9.0\text{s}$	$H_{13\%}=6.0\text{m}$ $T=10.0\text{s}$	$H_{13\%}=5.1\text{m}$ $T=9.0\text{s}$	$H_{13\%}=6.0\text{m}$ $T=10.0\text{s}$
文件名							
圆筒立面	125						
	86						
	114						
	90						
	72						
	52						
整个圆筒总水平力							
力臂							
整个圆筒所受的水平力矩							

试验二 波浪荷载对桩柱的水平作用力试验

一、试验原理简介

海洋上各类结构物大都处于开敞的海域，直接遭受波浪袭击，受到波浪力的作用。对于海洋结构物来说，波浪荷载是一项主要的环境荷载。波浪在静水面附近波动最大，最活跃，静水面附近的波浪力也就最大。导管架结构和桩式码头的桩柱是减小波浪力作用的较好结构形式。

小尺度结构物，通常是指近海工程结构物被波浪包围的构件横向尺寸 D 与波长 L 之比小于 0.2 时，则可按小尺度结构物受波浪力作用来考虑。本试验重点模拟小尺度结构物受波浪力作用。波浪对小尺度结构物的作用主要是粘滞效应和附加质量效应。

粘滞效应：由于流体的粘滞性而引起的粘滞效应，使结构物受到阻力（或称流速力或拖曳力）作用。

附加质量效应：由于流体运动的惯性及结构物存在而引起的附加质量效应，使结构物受到质量力（或称惯性力）作用。

当波浪作用在小尺度孤立桩柱上时，形成波浪绕流，这时几乎不产生波浪反射和波浪破碎，认为桩柱存在不影响波浪运动状态。当波浪绕过桩柱时，使桩柱受到波浪力作用。当桩柱间距 l 大于 4 倍桩柱直径 D ，即 $l/D \geq 4$ 时，桩柱周围波浪绕流基本上不受影响，这时各桩柱便可以认为是孤立桩柱，桩柱间受力不受干扰，可分别计算各桩柱上的波浪力。

1. 莫里森方程

计算小尺度孤立桩柱上的波浪力首先由莫里森提出，认为波浪力使水流经物体时速度引起的阻力和水体加速度引起的惯性力的线性迭加，阻力是绕流时水质点运动速度突然变化而形成，与速度平方及阻水面积成正比；惯性力是水质点原有轨迹运动的加速度及被物体排开水体的质量成正比。作用在桩柱单位长度上的总波浪力，由下给出。

$$dP = \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| dz + C_M \rho A \frac{du}{dt} dz \quad (36)$$

这就是众所周知的莫里森方程，整个桩柱水平波浪力为：

$$P = \int_{-d}^{\eta} dP \quad (37)$$

式中 P ——作用在构件上的总波浪力，kN；

u ——水质点相对于构件的垂直于构件轴线的速度分量，m/s； $|u|$ 为其绝对值，

当海流和波浪联合对平台作用时， u 为水质点的波浪速度矢量与海流速度矢量之和在垂直于构件方向上的分矢量；

$\frac{du}{dt}$ ——水质点相对于构件的垂直于构件轴线的加速度分量， m/s^2 ；

ρ ——水的密度， kg/m^3 ；

D ——构件直径，当平台有海生物附着时，应包括海生物的附着厚度， m ；

A ——构件截面积， m^2 ；

C_D ——垂直于构件轴线的拖曳力系数。必要时，应尽量由试验确定。在实验资料不足时，对表面光滑圆形构件取 0.65，对表面粗糙圆形构件取 1.05；

C_M ——惯性力系数，应尽量由试验确定。在实验资料不足时，对表面光滑圆形构件取 1.6，对表面粗糙圆形构件取 1.2；

η —— $z=0$ 的波面方程， m 。

在应用 Morison 方程时，水质点的瞬时速度和加速度必须依据波浪理论——线性波理论（Airy 波），Stokes 波理论，孤立波理论，流函数理论等。对于相同的微分方程和边界条件，不同的波浪理论可提供大致相似的解。这些波浪理论的选择应该符合相应规范提供的波浪条件，同时假定结构物的存在不影响波浪运动特征，即只能应用于小尺度结构物的波力计算，也就是 $D/L \leq 0.2$ 时，才能应用 Morison 方程计算作用在结构物上的波浪力。

2. 孤立桩柱水平波浪力计算

在波浪运动中的水质点速度和加速度是沿水深而变化的，欲求水下某段桩柱水平波浪力时，可将水质点速度和加速度代入式（37）中进行积分。其中水质点速度和加速度应根据选用的波浪理论来决定，取桩柱轴线处的水质点水平速度和加速度值。现以微幅波作为选用的设计波来推导相应的孤立桩柱波浪力。

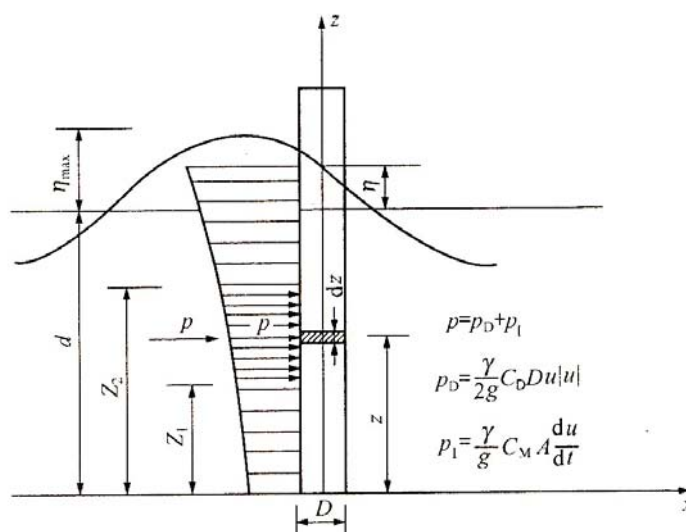


图 15 孤立桩柱受力情况

在图 15 中，设桩柱轴线为竖向坐标轴 z ，向上为正，为使公式推导简化，将水平坐标轴 x 设在静水面。首先将微幅波的水质点速度和加速度的水平分量的

表达式, $u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$, $v = \frac{\pi H}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$ 代入式 (36) 中, 则有:

$$P_{z_1 - z_2} = \frac{1}{2} C_D \rho \left(\frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh kd} \right)^2 \cos(kx - \omega t) |\cos(kx - \omega t)| \cdot \int_{z_1}^{z_2} \cosh^2 kz dz + C_M \rho A \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{1}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \int_{z_1}^{z_2} \cosh kz dz \quad (38)$$

如果求桩柱在高程 z_1 到高程 z_2 段上的水平力时, 则将上式积分便可得到, 即

$$P_{z_1 - z_2} = \frac{1}{2} C_D \rho \left(\frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh kd} \right)^2 \cos(kx - \omega t) |\cos(kx - \omega t)| \cdot \int_{z_1}^{z_2} \cosh^2 kz dz + C_M \rho A \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{1}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \int_{z_1}^{z_2} \cosh kz dz \quad (39)$$

其中积分

$$\int_{z_1}^{z_2} \cosh^2 kz dz = \int_{z_1}^{z_2} \frac{1 + \cosh 2kz}{2} dz = \frac{2kz_2 - 2kz_1 + \sinh 2kz_2 - \sinh 2kz_1}{4k}$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \cosh kz dz = \frac{\sinh kz_2 - \sinh kz_1}{k}$$

$$\text{又 } \rho = \gamma / g, \quad A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad k = \frac{2\pi}{L}$$

将上述各值代入式 (37) 中, 经整理, 得到下式:

$$P = P_{D \cdot \max} \cos(kx - \omega t) |\cos(kx - \omega t)| + P_{I \cdot \max} \sin(kx - \omega t) \quad (40)$$

式中:

$$P_{D \cdot \max} = C_D \frac{g D H^2}{2} \cdot K_1 \quad (41)$$

$$P_{I \cdot \max} = C_M \frac{\gamma \pi D^2 H}{8} \cdot K_2 \quad (42)$$

$$K_1 = \frac{2kz_2 - 2kz_1 + \sinh 2kz_2 - \sinh 2kz_1}{8 \sinh 2kd} \quad (43)$$

$$K_2 = \frac{\sinh kz_2 - \sinh kz_1}{\cosh kd} \quad (44)$$

$P_{D \cdot \max}$ 、 $P_{I \cdot \max}$ 通常称为孤立桩柱最大水平阻力, 最大水平惯性力。

3. 孤立桩柱上最大水平波浪力

以上讨论的是在一个波浪周期内任意时刻的作用在桩柱上总水平波压力。对于孤立桩柱最大水平阻力, 最大水平惯性力的计算可参考港口水文规范小尺度桩

柱所受的波浪力的计算步骤。

二、试验目的

通过该试验加深波浪荷载对桩柱水平作用力的理解。加深不同直径的桩所受的最大水平阻力和最大水平惯性力与周期、波高、速度等关系理解。掌握具有不同的波要素的波浪对孤立桩的作用。验证孤立桩柱所受的水平作用力试验值与莫里森公式的关系。掌握用试验的方法测量桩柱式结构物的水平波浪力方法。

三、试验仪器设备

1. 试验水池

试验在大连理工大学港海教研室的波浪水池中进行。水池长 50m，宽 8m，深 1.0m，水池的前端装备液压式不规则造波机，由计算机控制产生规则波和不规则波，同时采集波浪和波力信号。水池的末端设有 1:5 的块石消能坡，以减少波浪的反射影响。

2. 仪器 1

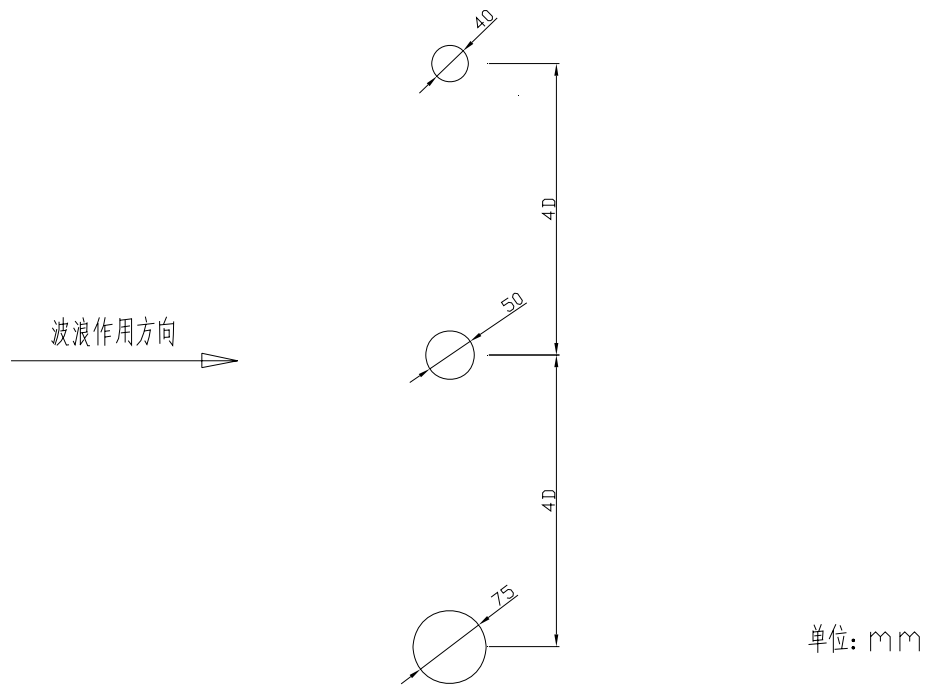
用 CBY-II 型波高测量控制系统测量波高，用总力测力计同步测量作用于整个桩上的水平波浪力，测力系统的自震频率为 7~8 赫兹，可不考虑动力反响的影响。

3. 仪器 2

《CSW-II 型压强和总力测量系统》是采用先进的电子技术、传感技术和计算机硬、软件技术最新研制成功的计算机多点同步测量系统，系统可同步采集处理 27 点压强（本次实验不用）和 27 点总力（本次试验采用的 3 点总力测量）。

四、试验介绍

该试验模拟波浪作用下的海上桩柱式结构物，测试孤立桩所受的水平波浪力（忽略横向力影响）。模型试验由三个不同的直径的桩柱组成，平面布置如图 16 所示。试验桩柱模型上端安装总力测力计，同时固定在水池上部测试架上，让试验桩柱成悬臂梁，在悬臂梁下端距水池地面 1.0mm 左右（见图 17 和照片 18），试验模型摆放在水池中间位置。



三种不同桩径测力平面布置图

图 16 三种不同桩径测力平面布置图

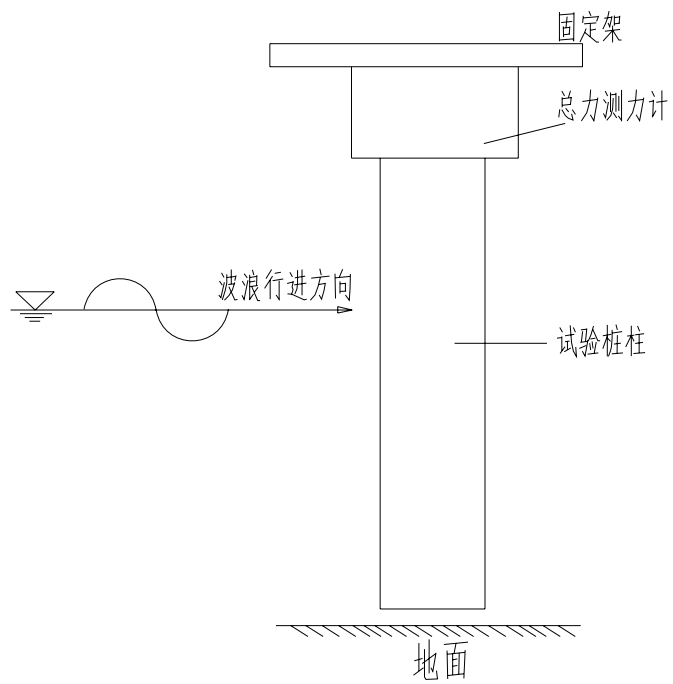


图 17 总力测力计布置示意图



图 18 总力测力计、桩和上部支架布置示意图

试验中模型采用正态模型，保证外形几何尺寸与原形桩柱相似，给出的试验值（模型尺寸、水深、波高、周期）均为模型值。因此试验中的实测值、理论计算值均按照模型值取值。

试验桩柱模型直径取 40mm、50mm、75mm 三种；试验水深取 50cm；波浪要素波高分别为 $H = 7-15$ cm， $T = 1.3-2.0$ s。试验组合见表 3。

在试验时，同学三人一组，一人操作造波机，使造波机造出波高分别在 $H = 7-15$ cm，周期 $T = 1.3-2.0$ s 的波浪要素，并同时记下波浪要素的统计结果，作为计算波浪力的依据。另外二人在模型前操作总力测量系统软件，在造波机造波同时，采集桩柱所受的总力，并将采集的数据文件记录下来，作为计算结果和试验结果进行比较，同时分析误差的依据。根据时间，试验重复 2-3 次，同学可交换操作仪器和设备。

试验数据记录表

表 3

试验 水深 (cm)	波高 (cm)	周期 (s)	桩径 (mm)	试验值 记录文 件名	最大水平 作用力试 验值
50			40		
			50		
			75		
			40		
			50		
			75		

五、试验报告内容要求

1. 试验原理及试验目的、试验内容。

2. 将试验测量的数据整理添入表 3-1 中；

3. 三人分别选取桩径 $D=40$ mm、50mm、75mm 三种情况，来计算桩柱上最大水平波浪力(根据《港口工程水文规范 JTJ213-98》里的条文 8.3，要求有详细的计算过程)；因为是每组的波浪要素各不相同，每个组三个人又选取不同的桩

径，因而每个人的计算结果各不相同。

4. 将三种不同桩径所受的总力实验值用画图软件画出。

5. 找出试验值得最大水平波浪力和你计算的最大水平波浪力进行比较，并分析误差可能出现的原因。（必需要有分析过程，写在试验报告中）

6. 对于受波浪作用的群桩，当桩间距离 l （桩轴线间距离）与桩径 $l/D < 4$ 时，桩与桩之间的波浪作用则要产生不可忽略的影响。由于每根桩在群桩中所处的位置不同，则会受到不同影响作用。当桩列平行于波浪行进方向时，前桩对后桩有掩护作用，称作遮帘作用；当桩列垂直于波浪行进方向时，同一列桩之间要产生相互干扰，称作干扰作用。这两种作用就是群桩效应。当考虑群桩效应时，我们所测到每根桩水平力将可能发生什么变化？试查文献资料并根据自己的分析得出相应的结论。（必需有此项）

试验三 斜坡式防波堤试验

一、斜坡式防波堤简介

防波堤主要是用来防御波浪的侵袭，维护港内水域的平稳，以保证船舶在港内安全地停泊和进行装卸作业；防波堤还可用来拦阻泥沙减轻港内淤积和防止流冰大量涌入池内。由于防波堤直接承受巨大的波浪力的作用，有时还承受巨大的冰荷载的作用；大多位于水深浪大处，造价高，占港口工程总投资的很大部分。

斜坡堤是防波堤的一种主要形式，在筑港中得到广泛采用。斜坡式防波堤的结构形式主要有三类：抛石防波堤、人工块体护面防波堤、土砂心防波堤。在开敞海岸的港口中，由于波浪较大，应用最广的是人工块体护面的防波堤。图 1-1 是我国某港口用人工块体作护面的防波堤试验断面。

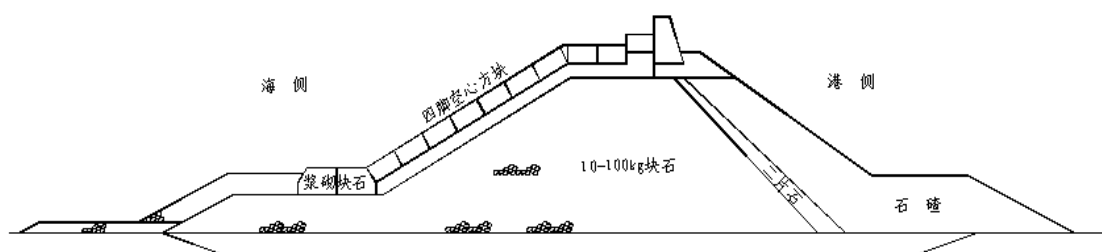


图 1-1 某港口防波堤试验断面

护面采用抛石、安放混凝土人工块体的斜坡式防波堤主要由堤心、垫层、护面块体、棱体、护底块石、胸墙组成。

1. 堤心

堤心是斜坡堤的主体，通常采用重 10~100Kg 不分级块石堆积而成，堤心也有用山皮石渣抛填的。

2. 垫层

垫层在人工块体与堤心石之间，为防止堤心石从护面块体缝隙中跑掉并使混凝土护面块体有良好的支撑面，因此它的下面应设块石垫层。此外垫层能够保护堤心石在防波堤施工期间不至于被波浪冲散。

3. 护面块体

为增强护面的稳定性，提高抵御波浪的能力，常用消浪效果好、抗浪能力强的混凝土人工块体做护面块体。最常见有四脚空心方块、四脚锥体、扭王字块体、扭工字块体、栅栏板等。人工块体模型见图 1-2。



a、四脚空心方块



b、四脚锥体



c、扭王字块



d、扭工字块



e、栅栏板

图 1-2 常用的几种人工块体

4. 棱体

港外侧通常设置水下抛石棱体，用以支撑护面块体。当水深较浅且地基较好时也可以不设置抛石棱体。

5. 堤前护底块石

在可冲刷地基上建防波堤建筑物，堤底应铺设垫层。为了保护地基不被冲刷，斜坡式防波堤堤前应设护底块石层，其块石大小，根据堤前流速确定。

6. 堤顶胸墙

胸墙可以是现浇或预制混凝土，也可以是浆砌块石胸墙，其断面尺寸的确定应根据波浪力计算及稳定性验算来确定。

二、试验目的

通过斜坡式防波堤的实验，使同学们能够掌握用试验的方法验证波浪荷载作用下斜坡堤的稳定性。为专业课的学习及在做斜坡式防波堤设计时，应考虑的一些实际工程问题，对挡浪墙的稳定状况、堤顶的越浪情况、护面块体、护底块石的选择等做到更合理、更科学。

三、试验实例介绍

我们选择的试验为一实际工程案例，试验原模型为某人工岛岛体建设工程护岸断面稳定性试验，我们按规范要求对原试验略作修改以便教学示范（图 1-3 为试验断面图，见附页）。斜坡堤护面安放两种块体，四角块体和块石。四角块体安放方法：下层正放，一行一脚向坡顶，另一行两脚向坡顶，相间放置，彼此紧密相接，上层插空正放（见照片 1、2）。护面块石摆放两层。波浪力是作用在

防波堤上的主要荷载。试验要求在极端高水位、设计高水位时，在给定的波浪荷载作用下研究防波堤的稳定性。

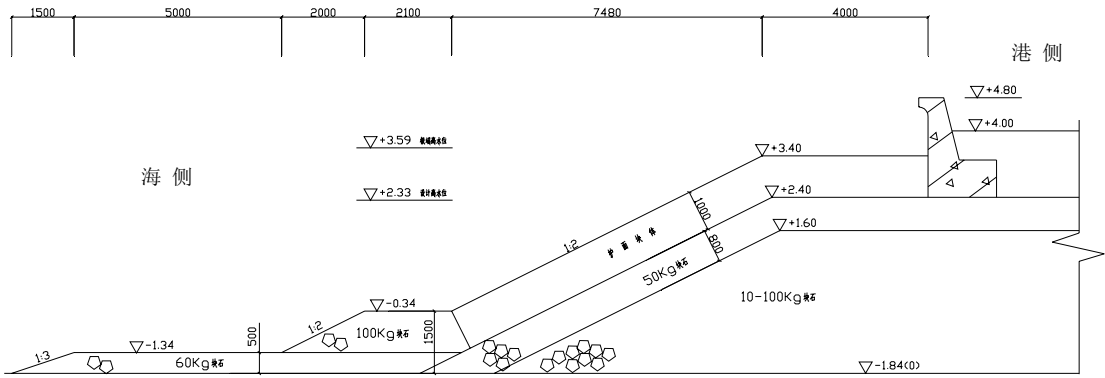


图 1-3 模型试验断面图

1. 工程水文条件（由设计单位提供）

该工程海域浪型以风浪为主，涌浪很少，浪向以 SSW 向频率最大，因此采用 SSW 向设计波浪要素，波浪要素重现期为 50 年一遇。

(1) 水位

极端高水位：+3.59 m

设计高水位：+2.33 m

(2) 波浪（50 年重现期）

极端高水位： $H_{1\%}$ ： 1.99 m

$H_{5\%}$ ： 1.5 m

$H_{13\%}$ ： 1.2 m

T ： 6.2s

设计高水位： $H_{5\%}$ ： 1.5 m

$H_{13\%}$ ： 1.2 m

T ： 6.2s

(3) 水深

依据海床高程： -1.84 m

设计高水位水深： 4.17 m

极端高水位水深： 5.43 m

2. 试验方法

(1) 试验比尺的确定

试验依据《波浪模型试验规程》(JTJ/T234—2001)。根据弗劳德重力相似准则及实验室现有设备条件，试验模型的几何比尺定为 1:15。原型设计参数值与试验参数值换算见表 1-1。

长度比尺： $\lambda = 15$

时间比尺： $\lambda_t = \lambda^{1/2} = 15^{1/2}$

重量比尺： $\lambda_F = \lambda^3 = 15^3$

原型设计参数值与试验参数值换算（ $\lambda = 15$ ） 表 1-1

试验参数值	原型值	模型值
极端高水位（+3.59m） 水深	5.43 m	36.2 cm
设计高水位（+2.33m） 水深	4.17m	27.8 cm
波高 $H_{1\%}$	1.99m	13.27 cm
波高 $H_{5\%}$	1.5 m	10.0 cm
波高 $H_{13\%}$	1.2 m	8.0 cm
波浪周期 T	6.2 s	1.6 s
四角锥体	270 kg	80 g
块石	300 kg	88.9g
	100 kg	29.6 g
	60 kg	17.8 g
	50 kg	14.8 g
	10~100 kg	2.96~29.6 g
胸墙	5.175 T/m	23.0 kg/m

（2）试验模型的确定

试验模型采用正态模型，保证外形几何尺寸和重心及重量与原形相似，堤心石的级配满足规范要求。垫层块石、棱体块石、护脚块石经过筛选，重量偏差控制在规范要求范围±3%之内。人工护面块体、胸墙的模拟保证外形几何尺寸相似、重量相似及重心相似。

试验波浪要素的模拟采用规则波。试验水位及波浪要素按设计单位提供的要求进行。

3. 试验设备及测试仪器

（1）实验水槽

断面稳定试验为了观测一般在波浪水槽中进行。该实验水槽长 47 m、宽 1 m、深 1.3 m。水槽的前端加有直立式消能网、伺服电动机、推波板，设有出口口；水槽的尾端安装斜坡式消浪网以减少波浪的反射影响，尾端也设有出口口。造波

机可生成不规则波、规则波。

(2) 造波机

造波机由伺服电动机、机械推波板、控制仪、造波控制软件组成。

(3) 仪器

试验用主要仪器有波高传感器、《浪高应变滤波多测试仪》、《造波控制仪》、计算机。

试验中仪器的控制、试验数据采集、统计分析均由造波控制软件自动完成。

4. 试验内容

在试验断面模型摆放之前，将设计方提供的设计水位及波浪要素（原始波浪要素）转换成模型数据，测好的每组波浪要素以文件形式存放计算机以便试验中调用。然后摆放试验模型，试验模型摆放在波流水槽的靠近尾部位置。试验中调出测试好的数据文件造波，观察、记录在给定的波浪荷载作用下，防波堤的护面块体、棱体块石、护底块石及胸墙的稳定性和越浪状况，将试验结果填入表 1-2 中，每组实验重复三次。

四、试验报告内容与要求

1. 斜坡式防波堤的试验目的。
2. 该试验的模型比尺是根据什么确定的？
3. 在防波堤断面稳定试验中，将你观测、记录的试验结果填入表 1-2 中。
4. 通过对防波堤断面稳定性物理模型试验，你对该防波堤的设计做一评价；如胸墙有越浪或不稳定，请提出合理的改进方案。（图 1-4 为胸墙断面图，见附页）
5. 计算防波堤护面块体、护脚块石的稳定重量。
6. 实验报告要求统一格式。封面统一（校规定）、纸张统一（A4 纸）。

试验结果汇总表

表 1-2

水 位	波浪要素	胸墙 稳定 情况	越浪层 厚度 (cm)	护面块体 稳定情况		棱体 块石 稳定 情况	护底 块石 稳定 情况
				块石	四脚 锥体		
设计 高水位 +2.33m	$H_{1\%}=1.2\text{m}$ $T=6.2\text{s}$						
	$H_{5\%}=1.5\text{m}$ $T=6.2\text{s}$						

极端 高水位 +3.59m	$H_{13\%}=1.2\text{m}$						
	$T=6.2\text{s}$						
	$H_{5\%}=1.5\text{m}$						
	$T=6.2\text{s}$						
	$H_{1\%}=1.99\text{m}$						
	$T=6.2\text{s}$						

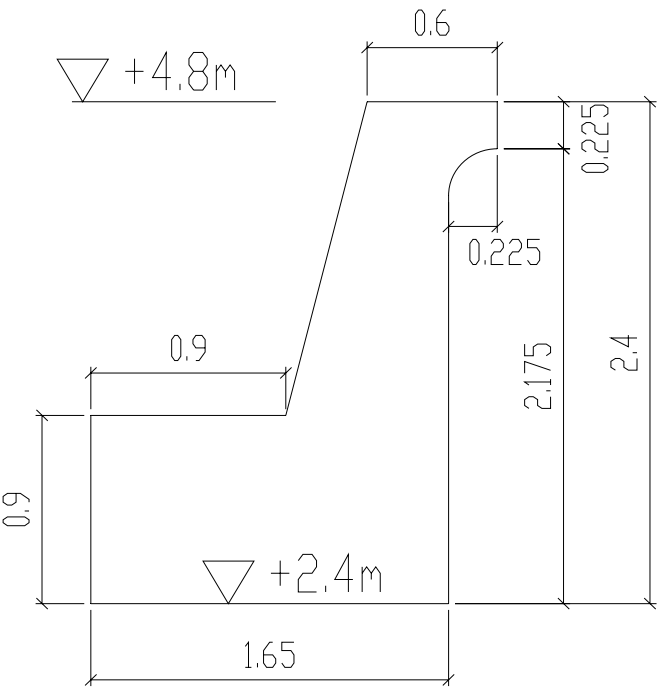


图 1-4 胸墙断面图（单位：m）