



不同质量级配堤心石 对波浪传播影响的试验研究

冯卫兵, 汤志生, 虞丹君

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过物理模型试验的方法, 采用规则波研究了深水斜坡堤堤心石物理特性的变化对于波浪传播的影响。在无越浪的前提下, 主要讨论了斜坡堤透浪系数与入射波周期、入射波高、质量级配等因素的关系。根据上述研究成果, 拟合得到了考虑无因次参数 H_i/d 、 gT^2/d 及堤心石结构 B/D_{50} 等因素的透浪系数计算经验公式, 为今后防波堤工程建设及科学研究提供一定的参考依据。

关键词: 堤心石; 质量级配; 透浪系数; 物理模型试验

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)11-0042-05

Experimental study on influence of wave propagation by different weight distributions of core stone

FENG Wei-bing, TANG Zhi-sheng, YU Dan-jun

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the rubble mound breakwater in deep water, the influence of the property of the core stone on the wave propagation is studied using regular waves in physical experiments. Without overtopping, the relations between the transmission coefficient of the rubble mound breakwater, the period and height of the incident wave, and the weight distribution of the core stone are discussed. An empirical formula of transmission coefficient in function of dimensionless parameters H_i/d , gT^2/d and B/D_{50} are fitted, which provide reference for breakwater construction and scientific research.

Keywords: core stone; weight distribution; transmission coefficient; physical experiment

随着国家经济、国防建设的迅猛发展与海岸工程技术的不断进步, 防波堤的设计水深越来越大^[1], 因此对堤心石石料的需求也不断增加。扩大堤心石的质量选择范围是一种比较可行的方法, 但具体能够放宽到什么程度, 以及这样变化以后对防波堤的正常使用有什么影响, 还亟需理论和试验研究。目前, 国内外关于防波堤堤心石在波浪作用下的运动和动力特性研究并不是很多, 主要是对堤心石内波浪衰减规律^[2]、波动压强分布^[3]以及模型试验比尺效应^[4-5]等方面进行一定的研究。

本文将通过断面物理模型试验, 研究堤心石的质量范围扩大后, 在规则波条件下, 斜坡堤的透浪系数与入射波周期、入射波高以及堤心石质量级配等因素的关系, 并拟合出规则波情况下, 斜坡堤的透浪系数公式, 旨在为今后的防波堤工程建设及科学研究提供一定的参考依据。

1 模型试验

1.1 样本制备

根据前人对堤心石模型比尺效应的研究成果来看, 采用大比尺的模型比较有利于减少多孔介

收稿日期: 2015-04-09

作者简介: 冯卫兵 (1960—), 男, 博士, 教授, 从事波浪方面的研究工作。

质中因黏滯力不相似而造成的流态和流动特性不相似的影响,但同时考虑到实验室试验设备及堤心石试验样本材料的选择等客观条件,本物理模型试验采用正态模型、重力相似原则,模型比尺定为 1:30。

本试验的样本原型为 1 200 kg 以下质量范围的堤心石 3 种(记为 P_1 、 P_2 、 P_3)和 2 200 kg 以下质量范围的堤心石原型样本 1 种(记为 P_4)。堤心石样本原型质量级配曲线见图 1,其中 P_1 、 P_2 和 P_3 的中值质量相同,均为 300 kg,但不均匀系数分别为 17、6.7 和 2.9,拉大三者不均匀系数的取值以期取得显著的试验效果。 P_4 的中值质量与前三者不同,为 450 kg,但不均匀系数与 P_2 相近。堤心石样本原型主要物理特性指标见表 1。试验按照原型的质量级配和模型比尺制作堤心石样本。

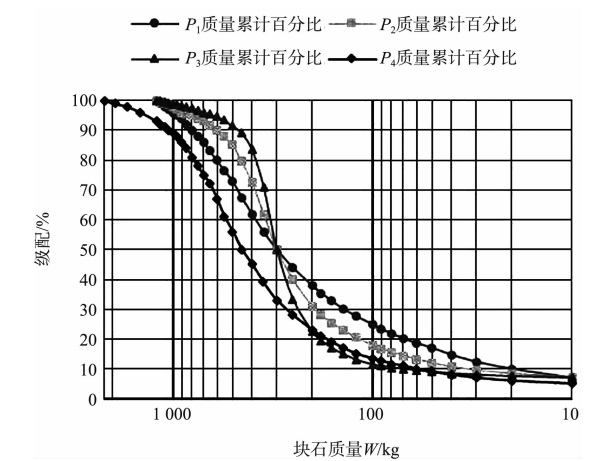


图 1 堤心石样本原型质量级配曲线

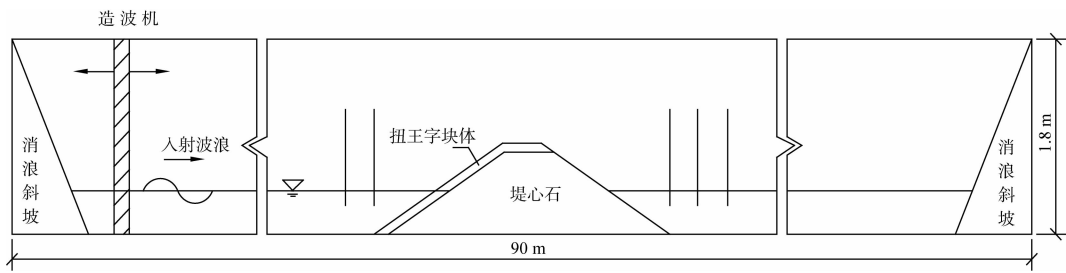


图 2 试验水槽及防波堤模型布置

1.3 波浪条件

试验采用规则波,取平均波高 H 为 10、15、20 cm,平均周期 T 为 1.1、1.5、1.9、2.3 s,4 种周期所对应的波长分别约为静水面处堤宽的

表 1 堤心石样本原型主要物理特性指标			
堤心石类别	中值质量 W_{50}/kg	中值粒径 D_{50}/m	不均匀系数 W_{85}/W_{15}
P_1	300	0.60	17.0
P_2	300	0.60	6.7
P_3	300	0.60	2.9
P_4	450	0.68	6.5

1.2 断面模型

物理模型试验在河海大学航道实验室波浪水槽内进行,水槽的有效长度为 90 m、高为 1.8 m、宽为 1 m。实际试验进行时使用外侧一半的水槽,即有效宽度为 0.5 m,内侧用于减小二次反射的影响。水槽一端为液压式推板造波机,有吸收装置,可以产生规则波和不规则波;水槽末端设置消能缓坡。波高数据采集使用的是中国水利水电科学研究院生产的 DJ800 型多功能监测系统及其配套的传感器。

试验按照 JTJ/T 234—2001 《波浪模型试验规程》^[6] 的要求进行模型制作。斜坡式防波堤模型断面堤高 84 cm、堤顶宽 38 cm、堤底宽 290 cm,体积为 $V=0.69\text{ m}^3$,静水面堤宽 170 cm(试验水深 40 cm),堤顶高程高出静水面 2.2 倍最大入射波高,以确保无越浪。防波堤迎浪面放置 370 g 扭王字块体,以保证护面层和堤身的稳定。堤前布置 2 根波高仪用于测量反射波高,堤后布置 3 根波高仪,本文取堤脚处波高仪测得的数据作为堤后波高值。试验水槽及防波堤模型的布置见图 2。

1 倍、1.5 倍、2 倍、2.5 倍。试验波要素见表 2,表 2 中分别列出模型及原型的规则波波要素。试验中规则波平均波高和平均波周期的允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

表 2 规则波波要素

水深 d		波长 L		周期 T		波高 H	
M/cm	P/m	M/cm	P/m	M/s	P/s	M/cm	P/m
40	12	170.2	50.7	1.1	6.0	10	3.0
						15	4.5
		261.6	78.3	1.5	8.2	10	3.0
						15	4.5
		348.3	104.4	1.9	10.4	20	6.0
						10	3.0
		432.4	129.8	2.3	12.6	15	4.5
						20	6.0
						10	3.0
						15	4.5

注：表中 M 为模型值， P 为原型值。

1.4 试验方法

对于每个模型样本，采用间断造波法。根据表 2 中的波要素进行试验，每个波要素一次造波波数约 20 个，重复 3 次。3 次记录取其平均值作为试验结果。依据试验结果计算防波堤的透浪系数。防波堤的透浪系数定义为：

$$K_t = H_i/H_t \tag{1}$$

式中： H_i 为入射波高； H_t 为堤后渗透波高。

2 试验结果及分析

2.1 透浪系数随入射波周期的变化规律

在不同堤心石级配情况下，保持入射波高不变，研究透浪系数随着入射波周期变化的规律。根据试验数据绘制了不同堤心石级配下透浪系数随入射波周期的变化规律(图 3)。图 3 中 4 条曲线均呈幂次方增长，透浪系数随着入射波周期的增大其增势不断加快。这表明波周期越大其透浪性能越强。

图 3 中级配 1、级配 2 和级配 3 曲线十分接近，说明在质量范围和中值粒径相同的情况下，不均匀系数变化所造成的堤心石级配的不同对透浪系数的影响不大。但是，对比级配 2 和级配 4 的曲线发现，当入射波周期大于 1.5 s 时随着周期的增加，两者差距增大。说明随着堤心石质量范围的扩大，斜坡式防波堤对周期大于 1.5 s (原型中 8.2 s) 的波浪的消浪效果减弱。

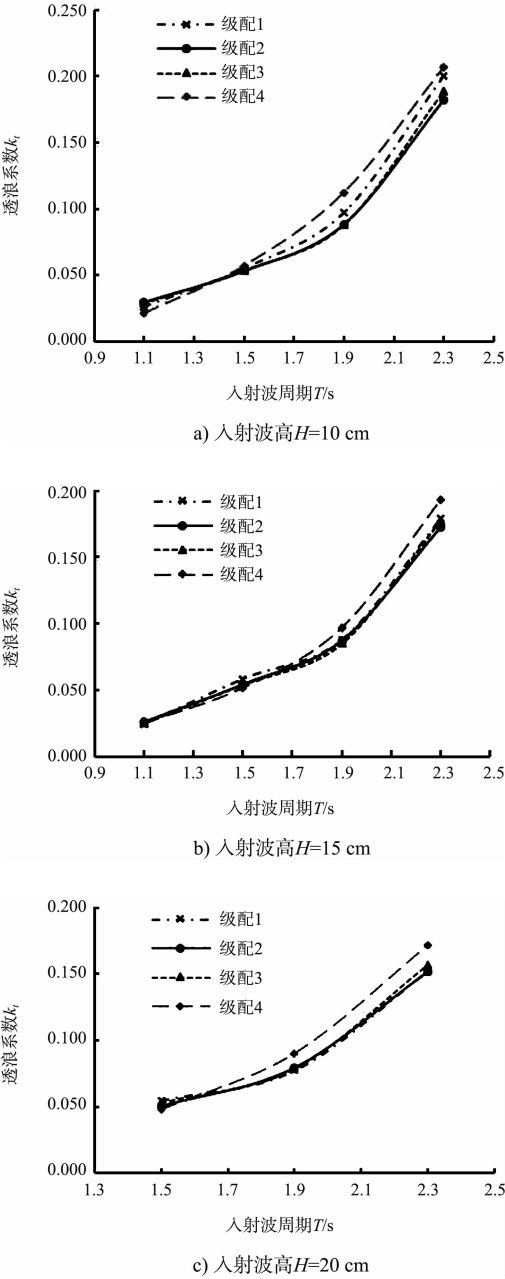


图 3 不同级配下透浪系数与入射波周期的关系

2.2 透浪系数随入射波高的变化规律

在不同堤心石级配情况下，保持入射波周期不变，研究透浪系数随着入射波高的变化规律。根据试验数据绘制了不同堤心石级配下透浪系数随入射波高变化的关系(图 4)。从图 4 可以看出，透浪系数随着入射波高的增加而减小，这个规律随着入射波周期的增大会变得明显。在短周期情况时，当入射波周期 $T=1.5\text{ s}$ 时(图 4 a))，随着入射波高的增加，斜坡式防波堤透浪系数减小得并不明显。

从图 4 可以看出, 级配 1、2、3 共 3 条曲线随着波高的增大其透浪系数差别并不大。比较级配 2 和 4 两条曲线, 在周期为 1.9、2.3 s 时, 级配 4 的透浪系数明显大于级配 2。

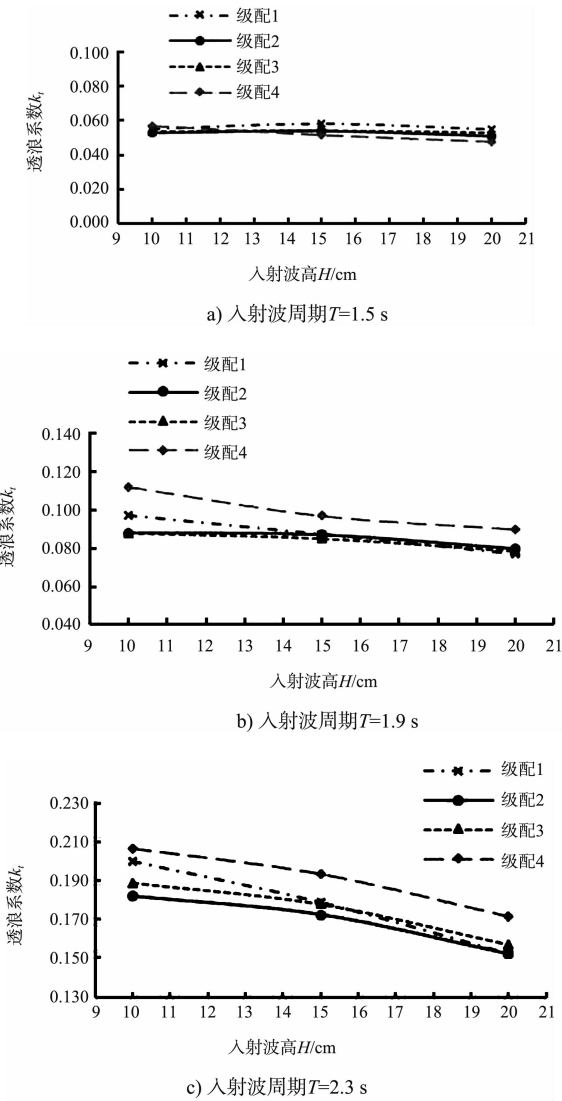


图 4 不同级配下透浪系数与入射波波高的关系

2.3 规则波透浪系数公式拟合

综上所述可知, 在规则波情况下, 透浪系数与入射波高、入射波周期和堤心石粒径大小有关, 受不均匀系数影响不大。因此, 基于王登婷等^[7]的研究成果, 引入无量纲因子堤心结构 B/D_{50} , 其中 B 为静水面处堤宽, D_{50} 为堤心石中值粒径。由于入射波高和入射波周期对于波浪能量衰减的影响程度不同, 因此对入射波高和入射波周期分别进行无量纲化, 取为 H_i/d 和 gT^2/d , 其中 d 为水深, 本物模试验中 d 为常量, 即 $d=0.4\text{ m}$, H_i 为

入射波高, T 为入射波周期, g 为重力加速度, 因此透浪系数 K_t 可表示为

$$K_t=f\left(\frac{H_i}{d},\frac{gT^2}{d},\frac{B}{D_{50}}\right)$$
 (2)

根据透浪系数 K_t 与各无量纲化因子之间的幂函数关系, 将透浪系数公式设为:

$$K_t=\beta\left(\frac{H_i}{d}\right)^{\alpha_1}\left(\frac{gT^2}{d}\right)^{\alpha_2}\left(\frac{B}{D_{50}}\right)^{\alpha_3}$$
 (3)

式中: β 、 α_1 、 α_2 、 α_3 为待定系数。对式 (3) 两边取对数得:

$$\ln K_t=\ln \beta+\alpha_1 \ln \left(\frac{H_i}{d}\right)+\alpha_2 \ln \left(\frac{g T^2}{d}\right)+\alpha_3 \ln \left(\frac{B}{D_{50}}\right)$$
 (4)

对于式 (4) 的待定系数可利用多元线性回归法^[8] 计算得到, 然后将得到的透浪系数经验公式的计算结果与物模试验结果进行对比分析, 再对系数进行校对, 最终可以得到规则波情况下的透浪系数计算公式:

$$K_t=7 \times 10^3\left(\frac{H_i}{d}\right)^{-0.209}\left(\frac{g T^2}{d}\right)^{1.315}\left(\frac{B}{D_{50}}\right)^{-0.255}$$
 (5)

透浪系数经验公式 (5) 的计算结果与物模试验值的对比见图 5, 其相关系数为 0.986。进一步对透浪系数计算值与试验值的绝对误差与相对误差进行计算, 结果见表 3。由图 5 和表 3 说明该规则波透浪系数计算公式拟合效果良好。

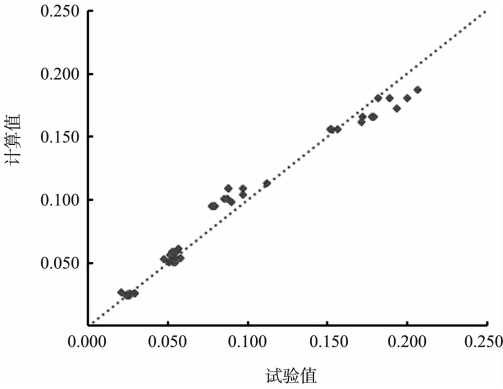


图 5 透浪系数 K_t 计算值与试验值对比

表 3 透浪系数计算值与试验值误差

类别	绝对误差	相对误差/%
最大值	0.021	28.23
最小值	0.000	0.09
平均值	0.008	8.88

3 结语

1) 规则波情况下, 同一级配堤心石的透浪系数随着入射波周期的增大呈幂次方增大; 随着入射波高的增大有减小的趋势。相比而言, 入射波周期对堤心石透浪系数影响远大于入射波高。

2) 在波要素相同的情况下, 堤心石的透浪系数随着质量范围和中值粒径的增大而增大; 而对相同质量范围、中值质量相同的堤心石而言, 不均匀系数对透浪系数的影响不大。因此, 在实际工程中, 对于质量范围及中值质量已经确定的情况下, 不均匀系数只要取适当的值即可。但在不均匀系数相同的情况下, 防波堤堤心石整体质量范围及粒径扩大之后, 对周期较大的波浪透浪系数有一定的影响, 而对小周期波浪透浪系数的影响并不大。因此, 实际工程中当堤心石质量范围扩大之后, 需要进行一定的验证研究方可应用于工程中。

3) 本文除引入无量纲因子堤心结构 B/D_{50} 外, 还对入射波高和入射波周期也分别进行了无量纲化。拟合出规则波下的斜坡堤透浪系数公式, 拟合结果令人满意。

参考文献:

- [1] 冯卫兵, 金鹰, 杨越, 等. 深水防波堤堤心石级配与沉降量对比分析试验研究[C]//第 14 届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2009: 563-567.
- [2] 习和忠, 潘建楠. 防波堤透浪特性的研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1988(4): 53-62.
- [3] Burger W, Oumeraci H, Partenscky H W. Geohydraulic investigations of rubble mound breakwaters[C]//Proc of the Int 21th Conf on Coastal Eng: ASCE, 1988: 2 242-2 256.
- [4] Jensen O J, Klinting P. Evaluation of scale effects in hydraulic models by analysis of laminar and turbulent flows[J]. Coastal Eng: ASCE, 1983(7): 319-329.
- [5] Timco G W, Mansard E, Ploeg J. Stability of breakwaters with variations in core permeability[C]//Proc of the Int 19th Conf on Coastal Eng: ASCE, 1984: 2 487-2 498.
- [6] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [7] 王登婷, 尹畅安, 周正萍. 透水斜坡堤堤心压力分布及衰减规律试验研究[C]//第 14 届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2009: 614-619.
- [8] 梁运江, 尹英敏. 利用 EXCEL 函数实现多元线性回归的简单方法[J]. 农业网络信息, 2003(9): 38.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 19 页)

参考文献:

- [1] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [2] BS 8110-2:1985 Structure use of Concrete-Part 2: Code of practice for special circumstances[S].
- [3] BS 5400-4:1990 Steel, concrete and composite bridges-Part 4: Code of practice for design of concrete bridges[S].
- [4] ACI 318-95: Building code requirements for structural concrete[S].
- [5] ACI 318-02: Building code requirements for structural concrete[S].
- [6] ACI 318-05: Building code requirements for structural concrete[S].
- [7] ACI 318-11: Building code requirements for structural concrete[S].
- [8] ACI 224R-01: Control of cracking in concrete structures [R]. 2001.05
- [9] EN 1992-1-1: Design of concrete structural. Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. European Committee for Standardization, 2004.
- [10] CEB-FIP Model Code 1990. Design Code[S].
- [11] 王元战, 赵冲久, 丁嵬, 等. 钢筋混凝土构件裂缝宽度计算方法[J]. 海洋工程, 2008(11): 111-116.
- [12] 李春秋, 陈肇元. 荷载作用下混凝土构件裂缝控制的若干问题[J]. 建筑结构, 2007(1): 114-119.
- [13] Gilbert R Ian. Tension stiffening in lightly reinforcement concrete slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(6): 899-903.

(本文编辑 武亚庆)