

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.02.007

可透浪斜坡式防波堤透浪系数对入射波要素的响应

潘天娇^{1,2},冯曦^{1,2},倪兴也²,冯卫兵^{1,2},马钢峰³

(1.河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏南京 210098;
2.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098; 3.美国欧道明大学土木与环境工程系,Norfolk Virginia 23455)

摘要:针对实际工程中的可透浪式斜坡式防波堤结构,在不考虑越浪的情况下,通过物理模型和数值模拟试验相结合的方法,对斜坡式防波堤的透浪特性进行了分析研究,讨论了斜坡式防波堤透浪系数与堤心石粒径、相对堤身宽度等堤身参数以及透浪系数与入射波高、入射波周期和波陡等入射波波要素之间的关系,根据试验结果分别提出了规则波和不规则波作用下不越浪斜坡式防波堤的透浪系数半经验半理论公式。验证结果表明,计算结果与试验结果拟合效果较好,可应用于可透浪斜坡式防波堤透浪系数的估算。

关键词:透浪系数;斜坡式防波堤;规则波;不规则波

中图分类号:U656.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)02-0045-09

Study on the response of wave transmission coefficient to various incident wave elements of a permeable sloping breakwater

PAN Tianjiao^{1,2}, FENG Xi^{1,2}, NI Xingye², FENG Weibing^{1,2}, MA Gangfeng³
(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection(Hohai University), Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Department of Civil and Environmental Engineering, Old Dominion University, Virginia 23455, USA)

Abstract: In view of the permeable sloping breakwaters in the practical engineering, wave transmission characteristics of the sloping breakwater were analyzed without considering the overtopping, by using the combined methods of physical experiments and numerical simulations. The relationship between the wave transmission coefficient of sloping breakwater and multiple wave parameters for breakwater and incident wave were mainly discussed, including the particle size of core material and relative dike width of breakwater body as well as the wave height, wave period, and wave steepness of incident waves. The semi-empirical formulas of wave transmission coefficient under regular wave and irregular wave actions for a sloping breakwater were fitted, respectively. Good agreement between the calculated results and the experiment results was achieved, which demonstrates that the proposed formulas can estimate the wave transmission coefficient of permeable sloping breakwater.

Key words: wave transmission coefficient; sloping breakwater; regular wave; irregular wave

斜坡式防波堤通常由堤心块石、护面块体等材料构成,其主要作用是阻挡外海波浪的传播,从而降低港内波高,保证港内水域平稳和正常作业。由于实体防波堤会限制港内外水体交换,影响近海生态环境,近年来可渗透防波堤在海岸工程中得到广泛应用。可渗透防波堤堤内块石孔隙较大,波浪容易透过堤身传至堤后,尤其在较长周期波浪区域。由于较长周期波浪穿透性强,且不易在堤后消减,影响了港内泊稳条件^[1],因此,需要对防波堤的透浪特性进行研究,通过合理设计,使之既能满足抗浪防灾的要求,又能兼顾对环境的最大保护。

波浪在穿透防波堤时,由于堤心石阻隔,消耗了部分能量并产生波能衰减。针对可渗透防波堤的特性,

基金项目: 国家自然科学基金(51809238,51779228);中央高校基本科研业务费专项(2019B06514)

作者简介: 潘天娇(1996—),女,硕士研究生,主要从事波浪与建筑物相互作用研究。E-mail:191303020010@hhu.edu.cn

通信作者: 冯曦(1987—),女,教授,博士,主要从事近海及中大尺度海域水动力特性研究。Email:xifeng@hhu.edu.cn

引用本文: 潘天娇,冯曦,倪兴也,等.可透浪斜坡式防波堤透浪系数对入射波要素的响应[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):45-53.

PAN Tianjiao, FENG Xi, NI Xingye, et al. Study on the response of wave transmission coefficient to various incident wave elements of a permeable sloping breakwater [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(2): 45-53.

国内外学者开展了相关研究,认为波浪的穿透性与防波堤堤心石尺寸^[2]、孔隙度^[3]、堤身宽度^[4-5]等物理特性,不同波浪类型、波高和周期^[6-7]等波浪特性,以及物理模型试验比尺效应均相关。目前,多数研究旨在寻找堤心材料^[8]或堤身结构本身与消浪系数之间的经验关系,少部分涉及透浪性能的内部机制探求,如孔隙压力与透浪特性之间联系^[9-11],由此也产生了一些不越浪斜坡式防波堤透浪系数的半经验半理论公式^[2,6,12-16]。

然而,上述公式多建立在实验室规则波情境下,针对不规则波透浪性的研究较少;同时,多数研究关注堤坝内部结构对透浪系数的影响,却鲜有探讨波浪本身的特征要素对穿透力的影响;而后者则决定防波堤设计方案的可适用性。本文结合物理模型与数值模拟试验,探讨不越浪-可透浪斜坡式防波堤的透浪特性对不同堤要素和波要素的响应,并比较了入射波分别为规则波与不规则波时透浪特性的不同,提出了更能反映真实情况的透浪系数表达式。

1 试验设备及布置

1.1 试验设备

物理模型试验在海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)的波浪水槽内进行。水槽有效长度80 m,宽1 m,高1.8 m,底面由光滑平整的混凝土砌筑而成,两侧为透明玻璃板。试验中,水槽被透明玻璃板隔成两半,即有效宽度为0.5 m。仅使用外侧进行试验断面铺设,内侧用于减小二次反射的影响。水槽前后端均设消能缓坡,以减小波浪反射。通过水槽一端的液压式推板造波机产生试验所需的规则波和不规则波。物理模型试验布置、模型精度、试验方法等均遵守JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》,根据物理模型相似理论,按照重力相似原则设计模型。结合实验室水槽尺度、模型断面尺寸、水深、波要素等条件,采用正态模型几何比尺1:30。

1.2 试验布置

斜坡式防波堤采用抛石结构,堤前迎浪面放置扭王字块体,护面块体不规则摆放,两侧坡度均为1:1.5,堤身高度为84 cm,堤身宽度(静水面处)采用110 cm、140 cm和170 cm 3种,堤心石由中值粒径 $D_{50}=0.017$ m、孔隙率 $n=0.45$ 的不均匀块石组成。试验水深保持不变, $d=40$ cm。斜坡式防波堤前后共布置6根浪高仪,用于测定波浪沿程的衰减,在进行堤后波高分析时采用浪高仪c的数值。斜坡式防波堤试验图、模型布置见图1。

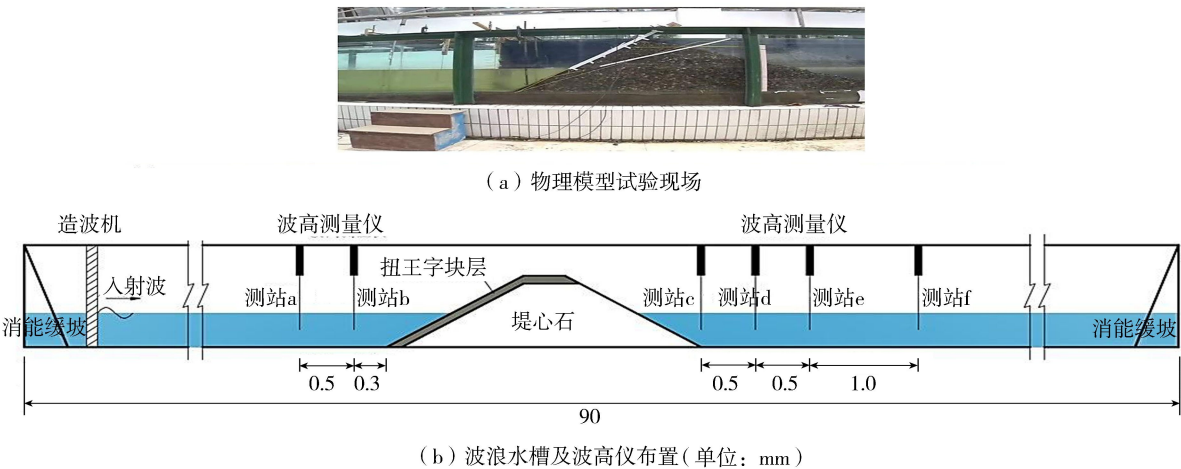


图1 斜坡式防波堤物理模型试验现场和波浪水槽及波高仪布置

Fig. 1 Site condition of physical model test and layouts of wave flume and wave gauges

1.3 波浪参数

入射波考虑规则波和不规则波(JONSWAP谱,谱峰高度因子3.3)两种情况,均按不越浪情形设计波浪入射条件。对每个模型样本,规则波试验采用间断造波法,以消除多次反射的影响。每组试验一次造波约20个,然后停机,待水面平静后再次造波,重复3次。不规则波每组试验时长250~300 s,停机待水面平静后再次造波,同样重复3次,均取平均值作为测量值^[17],总计试验组次为207组。采用DJ800型多功能监测系统对波浪数据进行采集,该系统由计算机、多功能监测仪和各种传感器组成。采用上跨零点法,通过调节阈值

消去由破碎和反射生成的波,规则波波高取 10 个波的平均波高 H ;不规则波特征波高取 $1/3$ 大波的值,即有效波高 H_s ,所对应的波周期记为有效波周期 T_s 。不同组次波要素见表 1。

2 数学模型及验证

2.1 模型控制方程

数值模拟采用非静压模型 NHWAVE^[18-19],基于体积平均-雷诺平均-NS 方程 (VARANS) 建立三维动压模型,可用于模拟动水压力、波浪作用下的自由表面运动等,并能较好地反映近海波浪的传播过程 (包括浅水变形,反射,透射,破碎等)。该模型主要控制方程如下:

表 1 规则波与不规则波透浪物理模型试验设计波浪要素
Table 1 Wave elements of regular wave and irregular wave transmission in physical model test of wave transmission

规则波		不规则波	
T/s	H/cm	T_s/s	H_s/cm
1. 1	5	1. 27	5
1. 5	10	1. 73	10
1. 9	15	2. 19	15
2. 3	20	2. 65	20

$$\frac{\partial}{\partial x_i^*} \left(\frac{u_i}{n} \right) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \left(\frac{u_i}{n} \right) + \frac{u_j}{n} \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{u_i}{n} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i^*} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left[(v + v_t) \frac{\partial}{\partial x_i^*} \frac{u_i}{n} \right] + R \frac{u_i}{n} \quad (i, j = 1, 2, 3) \tag{2}$$

其中

$$R = -a_p - b_p \left| \frac{u}{n} \right| - c_p \frac{\partial}{\partial t} \quad |u| = \sqrt{\sum_i u_i^2}$$
$$a_p = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^2} \frac{v}{D_{50}^2} \quad b_p = \beta \left(1 + \frac{7.5}{K} \right) \frac{1-n}{n^2} \frac{1}{D_{50}} \quad c_p = \gamma \frac{1-n}{n}$$
$$A = |u|/(nTg) \quad K = |u|T/(nD_{50})$$

式中: x_i^* 为笛卡尔坐标系; t^* 为时间; u_i 、 u_j 分别为 x_i^* 、 x_j^* 方向的速度分量; n 为有效孔隙率; p 为总压强; ρ 为水密度; g_i 为引力; v 、 v_t 分别为层流运动黏度和湍流运动黏度; Ru_i/n 为可渗防波堤中附加阻力项; R 为附加阻力系数; a_p 、 $b_p \left| \frac{u}{n} \right|$ 、 $c_p \frac{\partial}{\partial t}$ 分别为黏性效应引起的阻力、湍流效应引起的阻力以及多孔介质中加速流体的附加惯性效应引起的阻力,由 Van 等^[20-21]的研究给出; $|u|$ 为流速; α 、 β 为待定的经验系数,受堤心石级配、高宽比、形状及块石相对于平均流动方向的影响^[20],参考国内外学者的建议并结合本物理模型试验结果,拟定 $\alpha=200$ 、 $\beta=0.45$; γ 为与加速度参数 A 有关的经验系数,通常取 0.34 ^[21]; K 为 Keulegan-Carpenter 数,表示流体运动特征长度与多孔介质特征长度之比。

2.2 数值离散

NHWAVE 采用有限差分格式和有限体积法结合的方式求解方程,采用间断捕捉 HLL TVD 法离散动量方程。在求解湍流模型 ($k-\epsilon$) 方程组时,由 HPLA 法确定其对流项,该方法在空间上达二阶精度。为保证模型达二阶精度,时间积分采用二阶龙格-库塔迭代法^[22]。

第一阶段,采用投影法:

$$(1 + c_p) \frac{U^* - U^n}{\Delta t} = - \left(\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial \sigma} \right)^n + S_h^n + S_\tau^n + S_r^{(1)} \tag{3}$$

$$(1 + c_p) \frac{U^{(1)} - U^*}{\Delta t} = S_p^{(1)} \tag{4}$$

式中: U^n 为 n 时刻的 U ; U^* 为两步投影法的中间值; $U^{(1)}$ 为最终阶段的估计值。

第二阶段,采用相同的投影法将速度场更新到第二阶段的中间值,然后采用 Runge-Kutta 算法计算得到 $n+1$ 时刻的结果:

$$(1 + c_p) \frac{U^* - U^{(1)}}{\Delta t} = - \left(\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial \sigma} \right)^{(1)} + S_h^{(1)} + S_\tau^{(1)} + S_r^{(2)} \tag{5}$$

$$(1 + c_p) \frac{U^{(2)} - U^*}{\Delta t} = S_p^{(2)} \tag{6}$$

$$U^{n+1} = \frac{1}{2} U^n + \frac{1}{2} U^{(2)} \tag{7}$$

2.3 边界条件

为了求解相关方程,对所有物理边界设置边界条件。其自由面的边界条件^[19]表示如下:

$$\frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{w}{n} \Big|_{\sigma=1} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{u}{n} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{v}{n} \frac{\partial \eta}{\partial y} \tag{9}$$

在自由面上动压力为 0,对于 $k-\varepsilon$ 模型, k 和 ε 梯度为 0:

$$\frac{\partial k}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = 0 \tag{10}$$

在底部,规定了法向速度和切向应力,法向速度 w 通过运动学边界条件施加:

$$\frac{w}{n} \Big|_{\sigma=0} = - \frac{u}{n} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{n} \frac{\partial h}{\partial y} \tag{11}$$

2.4 模型验证

利用偏差指数 B 和离散指数 S 进行模型验证:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_m - H_o) \tag{12}$$

$$S = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_m - H_o)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_o} \tag{13}$$

式中: N 为波高样本个数; H_m 为数学模型结果; H_o 为物理模型结果。偏差指数和离散指数越接近 0,代表数学模型结果和物理模型结果越接近。图 2 分别为在规则波和不规则波作用下通过可透浪斜坡式防波堤的波高数值模拟值(纵坐标)和物理模型试验值(横坐标)的对比。其中,规则波下 $B=0.011, S=0.121$,不规则波下 $B=0.023, S=0.055$ 。结果表明不论是规则波还是不规则波,NHWAVE 模型都可以较好地模拟不越浪可渗透斜坡式防波堤的透浪过程。

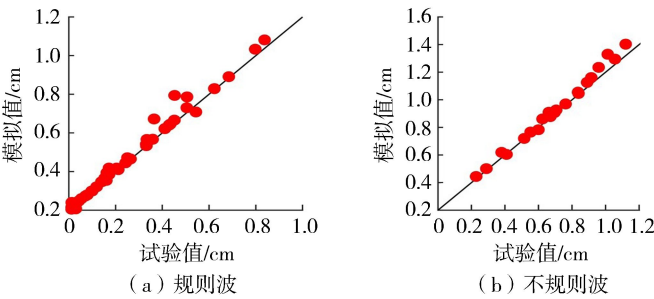


图 2 堤后波高数值模拟值与物理模型试验值对比

Fig. 2 Comparison of numerically simulated wave height and measured wave height from physical experiments behind breakwater

2.5 模型数据

在数值模型验证良好的条件下,利用数值模型补充物理模型试验未能考虑的组次以得到适用范围更广的规律;同时建立多种条件下,通过斜坡式防波堤前后波高变化的试验数据库。其中,水深分别取为 30 cm、40 cm;在静水面处物理模型试验堤宽分别为 52.3 cm、78.5 cm、104.4 cm,在数学模型中换算成相对堤宽,分别为 0.2、0.3、0.4;波高取为 5 cm、6 cm、7 cm、8 cm、9 cm、10 cm、11 cm、12 cm、15 cm、20 cm;规则波下入射波周期为 1.2 s、1.5 s、1.9 s、2.3 s,不规则波下谱峰周期为 1.27 s、1.73 s、2.19 s、2.65 s。

3 试验结果与讨论

波浪与可渗透斜坡式防波堤相互作用时,大部分波浪能量被很快耗散,其中一部分波浪经堤身反射回去,一部分透过堤身传至堤后。透浪系数 K_t 是衡量防波堤透浪特性的关键指标,其物理含义为堤后透射波

高与堤前入射波高的比值^[23-24]。 K_t 的大小反映了透浪式防波堤消减波浪的能力, K_t 越小,其消浪效果越强,透浪性越弱。在不越浪前提下,斜坡式防波堤的孔隙特性是透浪系数的重要影响因素,而孔隙特性与堤心石粒径有关。本文从堤心石粒径(D_{50})、入射波有效波高($H_{s,i}$)、入射波周期(T)3 个有因次量及相对堤宽(B/L , L 为入射波长)、波陡(H/L)两个无因次量出发,分析上述因子对透浪系数的影响规律。

3.1 堤心石粒径 D_{50} 的影响

从图 3 可以看出,在规则波或不规则波波况下,随着 D_{50} 的增加,透浪系数逐渐增大,即 D_{50} 越大,波浪越容易透过防波堤传入堤后水域影响堤后稳定。这是因为当粒径增大时,斜坡式防波堤孔隙率增加,导致透浪性增强。 D_{50} 越小,防波堤消浪效果越好,其中,不规则波的变化大于规则波。对规则波来说, $D_{50} = 0.5$ 时,波浪衰减了 99.4%,当 D_{50} 增加到 3.5,波浪衰减了 98.7%,衰减幅度减小 0.7%;而对于不规则波, D_{50} 由 0.5 增加到 3.5,衰减幅度减小 3%。很明显,不规则波变化幅度更大,且在同一粒径下,不规则波的透浪系数更大,这是由于在同一条件下,不规则波的随机性较强,波形杂乱。因此,在实际工程区域内,宜选用较小质量范围的块石作为防波堤的堤心石。

3.2 入射波有效波高的影响

图 4 为堤前水深 0.3 m,入射波分别为规则波和不规则波条件下, K_t 随 $H_{s,i}$ 的变化情况,其中蓝色、红色、黄色的点分别表示 B/L 为 0.2、0.3、0.4。由图 4 可见,随着入射波波高的增大,各组次 K_t 均呈减小趋势,大部分呈线性递减且幅度较大,这与入射波波高增大会导致水体紊动消能效果更明显有关。此时, K_t 的变化还与相对堤身宽度和入射波周期有关。图 4 显示,多数条件下,相对堤宽越小, K_t 越大;周期越大 K_t 越大。图 4(a) 中,在规则波作用下,当 $T = 1.5$ s 时,随着 B/L 从 0.2 增加至 0.4, K_t 由 0.12 下降至 0.05;而当 $B/L = 0.2$ 时,随着 T 从 1.5 s 增加至 2.3 s, K_t 由 0.12 增至 0.17。由于趋势线存在叠加、交叉的情况, K_t 与波周期和波长的关系较波高更为复杂。

3.3 入射波周期的影响

图 5 为 K_t 随 T 递增的态势,其中蓝色、红色、黄色的点分别表示 B/L 为 0.2、0.3、0.4。堤前水深为 0.3 m,在规则波情况下, T 从 1.1 s 增大到 1.9 s 时, K_t 随之明显增大, T 继续增大到 2.3 s 时,波周期增大对 K_t 影响逐渐收敛;同样,在不规则波情况下,以有效波周期 T_s 代表入射波周期,当 T_s 从 1.27 s 增大到 2.19 s 时, K_t 增大趋势明显, T_s 从 2.19 s 增大到 2.65 s 时, K_t 增长趋于平缓。综上,以长周期涌浪为例^[25],对规则波和不规则波,可透浪斜坡式防波堤后对较短周期波的消浪效果明显,但随着波周期的增加,其消浪效果逐渐削弱。从不同簇群可见, B/L 影响透浪特性对入射波周期的响应。当 B/L 较大时, K_t 随 T 递增的规律不再显著。

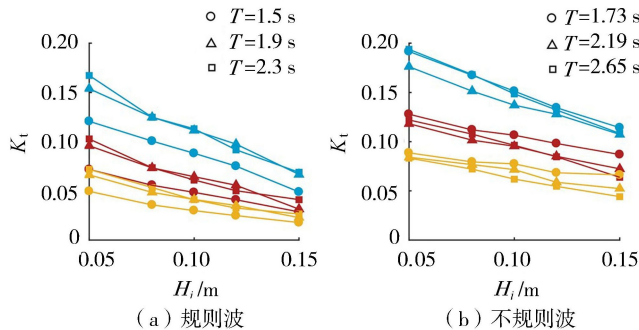


图 4 入射波波高的变化对透射系数的影响
Fig. 4 Influence of incident wave height on transmission coefficient

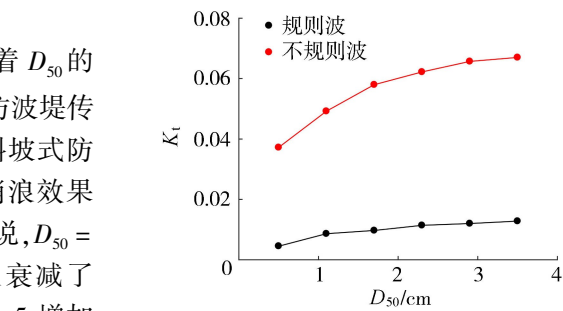


图 3 堤心石粒径的变化对透浪系数的影响
Fig. 3 Influence of particle size of core material on transmission coefficient

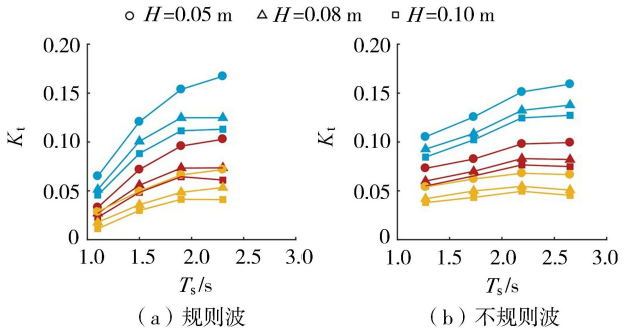


图 5 入射波周期的变化对透浪系数的影响
Fig. 5 Influence of incident wave period on transmission coefficient

3.4 相对堤宽的影响

进一步选取 B/L 分别为 0.2、0.3、0.4 的试验数据作为分析对象,图 6 对比了在规则波和不规则波条件下 K_t 随 B/L 的变化。由图 6 可以看出, K_t 随 B/L 的增加而减小,这一规律对规则波和不规则波皆适用,且后者更显著(趋势线梯度为前者同条件下的 1.5 倍)。很明显当堤宽增加时,波浪与堤身作用时间加长,不同类型波浪损耗能量均变多。从破碎角度来看,当堤宽加大后,波浪更容易发生完全破碎,导致波能减少,最终使通过堤身的波高也减小,消浪效果较好。图 6 也显示了透浪特性与波陡(H/L)相关。随着 H/L 的减小, K_t 增大,且随 B/L 递减的规律增强,这一特征在不规则波情况下表现明显。

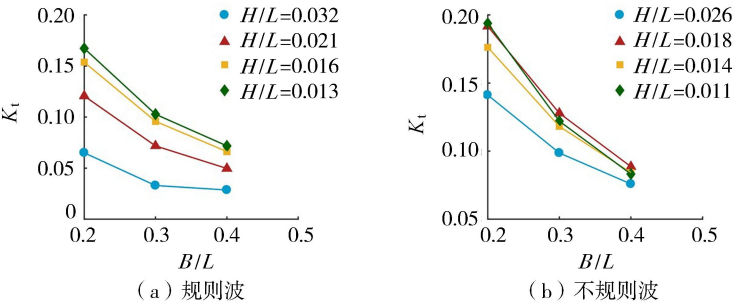


图 6 相对堤宽的变化对透射系数的影响
Fig. 6 Influence of relative dike width on transmission coefficient

3.5 波陡的影响

H/L 是影响波浪破碎形态的重要因素,坦波较陡波更不易发生破碎,因此坦波波能损失较小,消浪效果不如陡波。图 7 为 K_t 随波陡倒数(波坦 L/H)的变化规律。由图 7 可见, L/H 越大,即波浪越平坦, K_t 越大,即透浪性越强;且波陡对规则波的影响较不规则波显著,其透浪系数变化范围也更大。从能量角度看,入射波 H/L 越大,波浪在堤上越容易破碎,波浪与堤身相互作用更强烈,能量越容易损耗,穿过堤身的能量越少, K_t 随之减小。

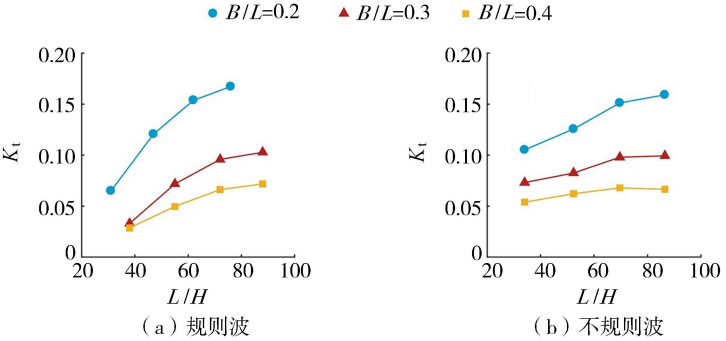


图 7 L/H 的变化对透射系数的影响
Fig. 7 Influence of wave steepness on transmission coefficient

4 经验公式拟合

由透浪系数影响规律分析可知, D 、 H 、 T 、 B/L 、 H/L 对 K_t 都有影响。水深为 0.3 m 时,根据微幅波理论,相同水深下波周期变化对应于波长变化,采用 H/L 反映 T 对 K_t 的影响。此外,由于波陡已含波高因子,不再单独考虑波高对 K_t 的影响,堤心石粒径也转化为相对值。采用多元线性回归法拟合得到 K_t 的计算公式,并将得到的经验公式计算结果与物理模型试验结果进行对比分析并校核,在试验条件范围内(模型中 T 为 1.1 ~ 2.3 s, H 为 5 ~ 20 cm,原型中 T 为 6.0 ~ 12.6 s, H 为 1.5 ~ 6.0 m, K_t 为 0 ~ 0.2) 规则波和不规则波情况下 K_t 计算公式分别为

$$K_t = 5.77 \times 10^{-3} \left(\frac{B}{D}\right)^{-0.047} \left(\frac{B}{L}\right)^{-0.632} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.429} \tag{14}$$

$$K_t = 3.54 \times 10^{-2} \left(\frac{B}{D}\right)^{-0.461} \left(\frac{B}{L}\right)^{-0.646} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.369} \tag{15}$$

为进一步验证式(14)(15)的准确性和适用性,在物理模型和数学模型试验数据的基础上,加入前人试验研究公开的数据(本文物理模型及刘涛等^[26]、王登婷等^[16]、丁坤等^[5]的试验数据),建立较完整的透浪试验数据库。利用数据库中的数据进行公式验证和比选。图 8(a)为基于式(14)的规则波 K_t 计算值与试验值的对比,其相关系数为 0.90。前期研究不乏关于不规则波透浪的试验数据,其中,Keulegan^[27]讨论了石块堆筑的斜坡式防波堤与波浪的作用;Zanuttigh 等^[13]对波浪能量的透射展开了研究;葛晓丹等^[15]研究了波浪与防波堤相互作用的波浪渗透问题。图 8(b)为基于式(15)的不规则波 K_t 计算值与物理模型试验数据及相关文献试验值的对比,相关系数达 0.95。结果表明,式(14)(15)可以应用于不越浪斜坡式防波堤的透射系数估算。

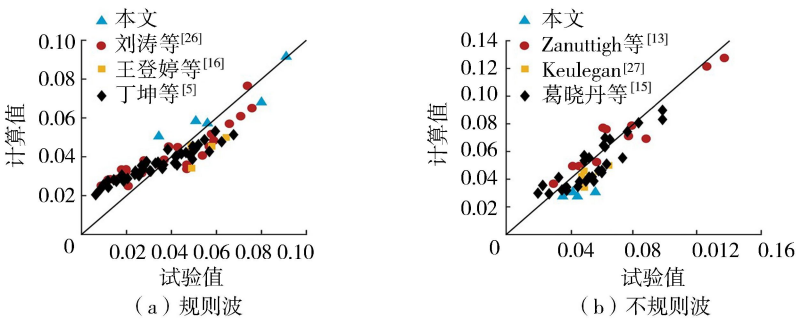


图 8 规则波和不规则波作用下 K_t 计算值与试验值的对比

Fig. 8 Comparison of calculated and experimental values of wave transmission coefficient K_t under regular wave action and irregular wave action

图 9 采用 Ahren^[28]、王登婷等^[16]、习和忠等^[14]、杨会利等^[6]、葛晓丹等^[15]给出的经验公式,分别在本文试验条件下进行 K_t 计算。从结果对比来看,习和忠等的计算结果偏差较大,比试验值大 4~5 倍,其原因是该公式基于斜坡式抛石堤,块石尺寸很大,堤身内部波高消耗较少,透过堤身波高较大。Ahren^[28]和沼田淳给出的经验公式^[15]计算值均大于试验值,这二者都是通过物理模型试验结果拟合得出的经验公式,Ahren^[28]的物理模型试验由粒径单一的石块堆筑而成,块石重量满足常用护面块体重量范围,与习和忠有一定粒径范围的块体相比有所不同;沼田淳的物理模型试验^[15]采用人工消波块体堆筑成的斜坡式防波堤,相比习和忠物理模型试验的堆石块体,消波块体使堤身内部波高消耗更大,导致渗透波高减小。王登婷等^[16]给出的经验公式计算值也大于试验值,其断面试验中堤心石尺寸考虑了模型比尺的影响,并适当扩大了堤心

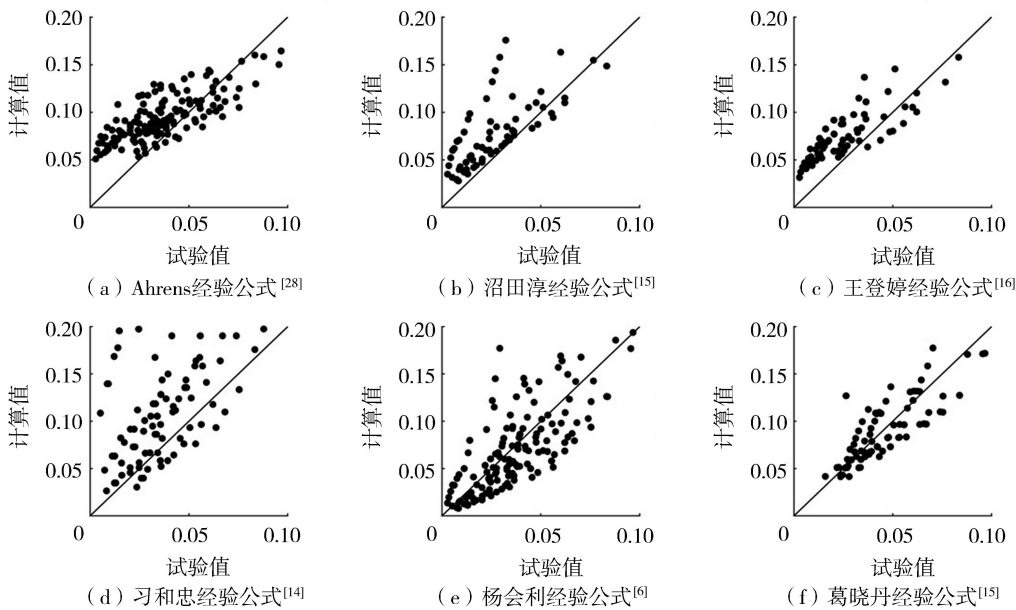


图 9 以往经验公式的 K_t 计算结果与试验值对比

Fig. 9 Comparison of calculated results from previous empirical formula and experimental results for wave transmission coefficient K_t

石尺寸,使波能内部消耗减小。但对于工程应用,计算值大于试验值是偏于安全的,因此习和忠等^[14]、Ahren^[26]、沼田淳及王登婷等的公式^[15-16]在实际工程应用时有一定的优势。杨会利等^[6]和葛晓丹等^[15]给出的经验公式计算值分布在试验值两侧,杨会利等^[6]的离散度相对较大,主要因为其考虑实际工程,模型尺度更大且比尺更大,此时会存在黏滞力的影响。葛晓丹等^[15]的公式采用王登婷等^[16]的试验数据拟合得出,并在其基础上引入相对水深这一影响因素。对比图8与图9可见,本文推导的斜坡式防波堤 K_t 计算公式与试验结果较为吻合,有一定的优势。

5 结 论

- a. 在其他条件不变时,透浪系数随堤心石粒径的增大而增大,且与入射波是否规则有关。
- b. 在波周期不变时,透浪系数随着波高的增大而减小,但在不越浪情况下波高对透浪系数影响较小。
- c. 在入射波波高不变时,透浪系数随入射波周期的增大而增大,且规则波变化较不规则波明显。
- d. 规则波和不规则波情况下,透浪系数均随着相对堤身宽度的增大而减小,在相同波浪条件下,不规则波时相对堤宽的影响比规则波更大。
- e. 相同入射波条件下,规则波和不规则波透浪系数均随波坦的增大而增大,不规则波情况下,波坦对堤后透浪系数更敏感。
- f. 综合上述波要素影响提出的透浪系数半经验半理论公式对试验数据拟合较好,相关系数均达0.9以上。因此,在本文数据库范围内,该公式可应用于不越浪-可透浪斜坡式防波堤透浪系数的估算。对范围外的情况,需结合物理模型试验进行确定。

参考文献:

[1] HOSSAIN A, KIOKA W, KITANO T. Transmission of long waves induced by short-wave groups through a composite breakwater [J]. Coastal Engineering Journal, 2001, 43(2) : 83-97.

[2] 冯卫兵, 汤志生, 虞丹君. 不同质量级配堤心石对波浪传播影响的试验研究 [J]. 水运工程, 2015(11) : 42-46. (FENG Weibing, TANG Zhisheng, YU Danjun. Experimental study on influence of wave propagation by different weight distributions of core stone [J]. Port & Waterway Engineering, 2015(11) : 42-46. (in Chinese))

[3] BOSMA C, VERHAGEN H J, D'ANGREMOND K, et al. Void porosity measurements in coastal structures [C]// Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering. Cardiff, Wales, United kingdom; American Society of Civil Engineers (ASCE), 2002: 1411-1423.

[4] HEGDE A V, SRINIVAS, RAO P. Effect of core porosity on stability and run-up of breakwaters [J]. Ocean Engineering, 1995, 22(6) : 519-526.

[5] 丁坤, 冯曦, 马钢峰, 等. 波浪非线性对斜坡堤透浪特性影响研究 [J]. 水运工程, 2020(4) : 1-8. (DING Kun, FENG Xi, MA Gangfeng, et al. Influence of wave non-linearity on wave transmission characteristics of rubble mound breakwater [J]. Port & Waterway Engineering, 2020(4) : 1-8. (in Chinese))

[6] 杨会利, 杨艳静, 戈龙仔等. 周期和波高对斜坡式防波堤透浪特性影响试验研究 [J]. 水道港口, 2019, 40(1) : 28-34. (YANG Huili, YANG Yanjing, GE Longzai, et al. Experimental study on the influence of period and wave height on the wave transmission characteristics of rubble mound breakwater [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2019, 40(1) : 28-34. (in Chinese))

[7] ZHANG N, ZHANG Q H, ZOU G L, et al. Estimation of the transmission coefficients of wave height and period after smooth submerged breakwater using a non-hydrostatic wave model [J]. Ocean Engineering, 2016, 122: 202-214.

[8] WANG D T, SUN T T, CHEN W Q, et al. Model test research of breakwater core material influence on wave propagation [J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(5) : 786-793.

[9] TIMCO G W, MANSARD E P D, PLEOG J. Stability of breakwaters with variations in core permeability [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering. Houston; American Society of Civil Engineers (ASCE), 1984: 2487-2499.

[10] BURGER W, OUMERACI H, PARETENSCKY H W. Geohydraulic investigations of rubble mound breakwaters [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering. Costa del Sol, Malaga, Spain; American Society of Civil Engineers (ASCE), 1988: 2242-2256.

[11] TROCH P, ROUCK J D, BURCHARTH H F. Experimental study and numerical modeling of wave induced pore pressure

- attenuation inside a rubble mound breakwater[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, Wales, United Kingdom; American Society of Civil Engineers(ASCE), 2002:1607-1619.
- [12] VAN DER MEER J W, BRIGANTI R, ZANUTTIGH B, et al. Wave transmission and reflection at low-crested structures; Design formulae, oblique wave attack and spectral change[J]. Coastal Engineering, 2005, 52(10)(10/11):915-929.
- [13] ZANUTTIGH B, MARTINELLI L. Transmission of wave energy at permeable low crested structures[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12):1135-1147.
- [14] 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, 1988(4):53-62. (XI Hezhong, PAN Jiannan. A study on the wave transmissibility of breakwater[J]. Advances in Hydrodynamics, 1988(4):53-62. (in Chinese))
- [15] 葛晓丹, 柳淑学, 李金宣. 斜坡堤透浪系数计算公式的对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(5):100-101. (GE Xiaodan, LIU Shuxue, LI Jinxuan. Comparative analysis of calculation formulas for wave transmission coefficients of sloping breakwater[J]. China Water Transport, 2014, 14(5):100-101. (in Chinese))
- [16] 王登婷, 左其华. 斜坡堤堤心石尺寸对波浪传播影响的试验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008(5):532-537. (WANG Dengting, ZUO Qihua. The experimental research of the rubble mound breakwater core material's influence on wave transmission[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics-A, 2008(5):532-537. (in Chinese))
- [17] 黄惠, 戴江山, 顾春元. 西码头小园山东防波堤断面波浪模型试验研究[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 上海:中国海洋学会海洋工程分会, 2009:4.
- [18] MA G, SHI F, KIRBY J T. Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes[J]. Ocean Model, 2012, 43-44:22-35.
- [19] MA G F, SHI F Y, HSIAO S C, et al. Non-hydrostatic modeling of wave interactions with porous structures[J]. Coastal Engineering, 2014, 91:84-98.
- [20] VAN G. The modelling of wave action on and in coastal structures[J]. Coastal Engineering, 1994, 22:311-339.
- [21] LIU P L F, LIN P Z, CHANG, K. A, et al. Numerical modeling of wave interaction with porous structures[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1999, 125(6):322-330.
- [22] GOTTLIEB S, SHU C W, TADMOR E. Strong stability-preserving high-order time discretization methods[J]. Siam Review, 2001, 43(1):89-112.
- [23] 张继生, 钱方舒, 童林龙, 等. 细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2):150-157. (ZHANG Jisheng, QIAN Fangshu, TONG Linlong, et al. Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2):150-157. (in Chinese))
- [24] 潘毅, 屈小开, 周子骏, 等. 海堤波浪溢流量的分布特征及估算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3):260-267. (PAN Yi, QU Xiaokai, ZHOU Zijun, et al. Distribution characteristics and estimation method of discharge of combined wave and surge overtopping in sea levees[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3):260-267. (in Chinese))
- [25] 刘晓良. 长周期涌浪作用下潜堤消浪的数值研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [26] 刘涛, 冯曦, 冯卫兵, 等. 基于基因表达式编程算法的波浪透射预测[J]. 海洋工程, 2021, 39(1):133-141. (LIU Tao, FENG Xi, FENG Weibing, et al. Prediction of wave transmission using gene expression programming[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(1):133-141(in Chinese))
- [27] KEULEGAN G H. Wave transmission through structures[J]. Transportation Research Board, 1973, 2:H-73-1.
- [28] AHREN J P. Characteristics of reef breakwaters[R]. Coastal Engineering Research Center TR87-17; US Army Corps of Engineers, 1987.

(收稿日期:2021-03-19 编辑:胡新宇)