



涵洞式直立堤透浪特性研究

黄 蕙¹, 马舒文¹, 王定略²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北武汉 430071)

摘要: 分析总结国内外透空式防波堤的研究成果基础上, 讨论了涵洞式直立堤透浪系数的影响因素。通过不规则波作用下涵洞式直立堤断面波浪模型试验, 分析了相对堤身入水深度(t/d)、相对防波堤宽度(B/L_s)、相对水深(d/H_s)、波陡(H_s/L_s)、相对胸墙高度(A/H_s)对透浪系数的影响。通过与Wiegel公式的对比找出误差原因, 并针对相对堤身入水深度(t/d)、相对防波堤宽度(B/L_s)、波陡(H_s/L_s)这3个要素在Wiegel公式的基础上拟合新的透浪系数公式, 并将拟合公式计算的透浪系数与试验值进行比较验证。研究成果对涵洞式直立堤的理论研究和工程设计具有较高的参考价值。

关键词: 涵洞式直立堤; 透浪系数; 物理试验; 经验公式

中图分类号: U 656.2⁴

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0025-05

Wave transmission coefficients of vertical breakwater with culverts

HUANG Hui¹, MA Shu-wen¹, WANG Ding-lue²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Researches, both at home and abroad, on permeable breakwaters are summarized and influential factors of the permeating wave coefficient are discussed. The model of irregular waves through the vertical breakwater with culverts is simplified, and a physical model experiment is carried out to study how the relative water entry depth(t/d), the relative width of the breakwater(B/L_s), the relative water depth(d/H_s), the wave steepness(H_s/L_s), the relative height of the breast wall(A/H_s) influence the wave transmission coefficients. The error causes are found by contrasting with Wiegel formula, based on which, a new fitting formula of the wave transmission coefficients are proposed according to the relative water entry depth(t/d), the relative width of the breakwater(B/L_s), the wave steepness(H_s/L_s), and its calculation results were compared with experimental records. The research results may serve as reference for the research and design of vertical breakwaters with culverts.

Key words: vertical breakwater with culverts; wave transmission coefficients; physical experiment; empirical formula

涵洞式直立堤是在重力式直立堤的基础上, 在底层开大型涵洞形成的透空结构, 主要由入水一定深度的直立堤堤面起消浪作用, 而涵洞位于底层, 对波浪的影响很小, 主要解决港池内外水沙交换的问题。该防波堤结构形式是根据波能集中分布在水体表面的特性设计的, 当波浪撞到涵

洞式直立堤以后, 波能转化成4部分: 堤前反射波波能; 堤后透射波波能; 波浪越过胸墙引起的堤后波能; 因波浪破碎、波浪水质点间的相互碰撞或产生漩涡而损耗的能量。由于波浪作用到涵洞式直立堤堤面时发生的破碎和反射, 消耗了部分波能, 从而削减了入射波的能量。

收稿日期: 2013-04-07

作者简介: 黄蕙(1964—), 女, 硕士, 副教授, 从事港口海岸及建海工程规划、设计、试验工作。

国外的许多学者^[1-2]很早就开始了对透空堤透浪系数的理论研究，总结了不同条件下透空式防波堤透浪系数的计算方法，其中Wiegel公式因其简洁的形式和合理的假设，为各国学者广泛采用，成为研究透浪系数的一个基础。我国规范^[3]所采用的是前苏联科学家拉帕教授所推导的公式。国内在透空堤理论研究方面^[4-9]也取得了不少成绩，大都结合具体的工程实践或者通过断面模型试验进行研究，提出了各自透浪系数的半经验半理论公式或者一些观点。

对于涵洞式直立堤，在我国并没有多少工程实例，还在建设中的广东省电白县的博贺中心渔港防波堤采用的是涵洞式削角直立堤，故缺少相关资料，至今也没有很好的适用公式。本研究分析了相对堤身入水深度 (t/d)、相对防波堤宽度 (B/L_s)、相对水深 (d/H_s)、波陡 (H_s/L_s)、相对胸墙高度 (Δ/H_s) 等主要因素对涵洞式直立堤透浪系数的影响，并针对相对堤身入水深度 (t/d)、相对防波堤宽度 (B/L_s)、波陡 (H_s/L_s) 对透浪系数的影响进行研究，提出对Wiegel公式的修正。

1 物理模型试验

1.1 试验设备

本研究采用的不规则波断面模型试验水槽长60 m，宽1 m，高1.5 m，中后部试验段用隔板将水槽分隔等间距的两部分，取外侧的50 cm水槽宽度进行本次模型试验。水槽一端安装有造波机，

末端铺设消浪设施。试验模型用有机玻璃制作，有机玻璃块D1~D7组成可以改变涵洞高度的堤身，其中D1和D7方块长50 cm，宽25 cm，高5 cm，D2~D6方块长50 cm，宽25 cm，高10 cm。有机玻璃方条X1~X5组成可以改变高度的胸墙，尺寸均为长50 cm，宽2 cm，高2 cm。另外用两根钢螺杆和螺栓以及钢支架固定防波堤模型。试验时可将D2~D6其中一个有机玻璃块的前后板撤去，其余有机玻璃方块中填充石料，形成涵洞。模型断面见图1。

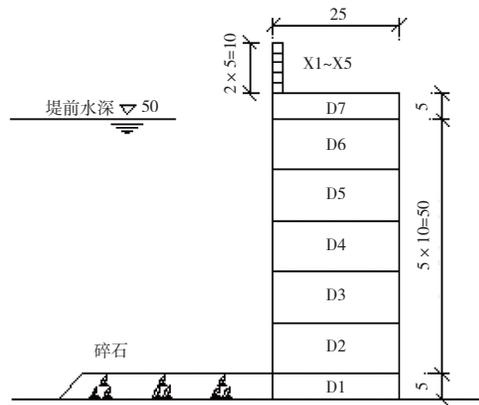


图1 试验模型 (单位: cm)

试验段水槽中心线上堤前距防波堤2.5, 2.75, 3.0 m处布置16#, 25#, 19#波高仪, 堤后距防波堤2, 3, 4 m处布置43#, 17#, 39#波高仪。水位、波高的量测采用水利部北京水电科学院研制的DJ800型水工试验采集系统及配套的监测系统、传感器、波高仪等。水槽及模型、波高仪布置见图2。

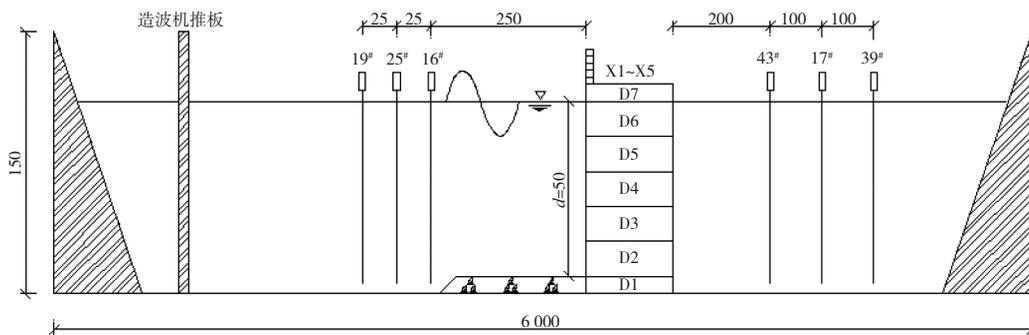


图2 试验水槽及模型、波高仪布置 (单位: cm)

1.2 试验方法

试验采用间隙式生波方式，每组不规则波波列持续时间约为4.0~6.0 min，波数约为150~250个，

然后停机，待水槽内平静后继续造波。同一组试验重复进行2次，再取其平均值作为试验结果。试验参数水深 $d=50$ cm和防波堤宽度 $B=25$ cm保持不

变, 有效波高 H_s 分别为5, 10, 15 cm, 有效波长 L_s 分别为150, 200, 250, 300, 400, 500 cm, 平均周期 T 分别为0.99, 1.17, 1.36, 1.55, 1.96 s, 堤身入水深度 t 分别为0, 10, 20, 30, 40, 50 cm, 胸墙高度 Δ 分别为5, 7, 9, 11, 13, 15 cm。试验组次共68组。

2 试验结果及数据分析

防波堤透浪系数 $K_t = H_{\text{堤后波高}}/H_{\text{入射波高}}$ 。堤前入射波高 $H_{\text{入射波高}}$ 取堤前入射波的有效波高值 H_s 。由于堤后透射波高的沿程变化相差不大, 故堤后波高 $H_{\text{堤后波高}}$ 取43[#], 17[#], 39[#]波高仪测得的数据的平均值。

2.1 相对堤身入水深度 t/d 对透浪系数 K_t 的影响

透浪系数 K_t 随着相对堤身入水深度 t/d 的增大而减小, 几乎成线性变化。试验中, 当堤身入水深度增大时, 防波堤的挡浪面积随之成线性增大, 被反射的波能也增大, 从涵洞中透射过去的波浪则减少, 故透浪系数 K_t 也随之减小。透浪系数 K_t 与相对堤身入水深度的关系见图3。

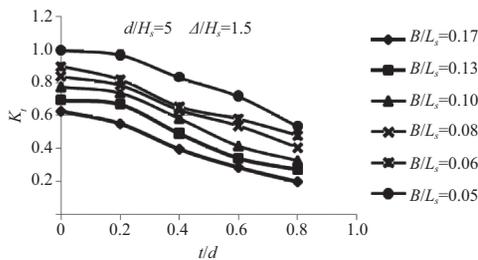


图3 透浪系数与相对堤身入水深度关系

2.2 相对防波堤宽度 B/L_s 对透浪系数 K_t 的影响

透浪系数 K_t 随着相对防波堤宽度 B/L_s 的增大而减小, 大致呈 $y=x^{-1}$ 的反比例函数曲线形式。试验中, 防波堤堤顶宽度 B 不变, 通过改变波长 L_s 来改变相对堤顶宽度 B/L_s 。当波长减小时, 相对防波堤宽度随之增大, 趋势呈 $y=x^{-1}$ 的幂函数曲线形式, 而波长越小, 波浪穿透能力越弱, 从涵洞中透射过去的波浪则越少, 故透浪系数 K_t 也随之减小, 且递减的趋势逐渐变缓。透浪系数 K_t 与相对防波堤宽度 B/L_s 的关系见图4。

2.3 相对水深 d/H_s 对透浪系数 K_t 的影响

相对水深 d/H_s 对透浪系数 K_t 的影响很微弱。试验中, 堤前水深 d 不变, 通过改变波高 H_s 来改变相对水深 d/H_s 。相对水深影响的是水槽底摩阻对波浪

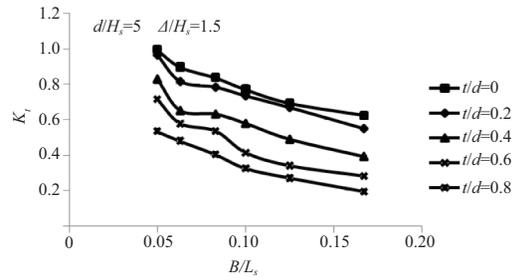


图4 透浪系数与相对防波堤宽度关系

作用的强弱, 本试验中, $d/L_s = 0.2$, 远大于浅水波的 $d/L_s = 0.05$, 底摩阻对波浪的损耗很有限, 所以相对水深对透浪系数的影响很小。透浪系数 K_t 与相对水深 d/H_s 的关系见图5。

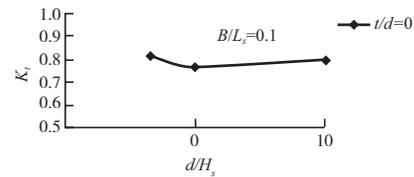


图5 透浪系数与相对水深关系

2.4 波陡 H_s/L_s 对透浪系数 K_t 的影响

透浪系数 K_t 随着波陡 H_s/L_s 的增大而减小, 大致呈 $y=x^{-1}$ 的反比例函数曲线形式。试验中, 入射波高 H_s 保持不变, 通过改变波长 L_s 来改变波陡 H_s/L_s 。当波长较长, 波陡较小时, 穿过防波堤的能量较多, 会在堤后形成较大的波高, 透浪系数 K_t 则越大。透浪系数 K_t 与波陡 H_s/L_s 的关系见图6。

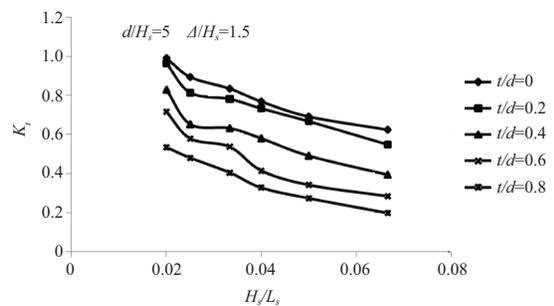


图6 透浪系数与波陡关系

2.5 相对胸墙高度 Δ/H_s 对透浪系数 K_t 的影响

透浪系数 K_t 随着相对胸墙的高度 Δ/H_s 的增大而减少, 但变化的幅度很小。在本试验中, 波浪大部分通过涵洞进入堤后, 胸墙高度对透浪系数 K_t 的影响不大。透浪系数 K_t 与相对胸墙高度 Δ/H_s 的关系见图7。

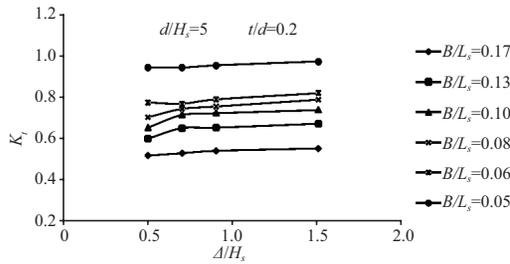


图7 透浪系数与相对胸墙高度关系

3 修正公式

Wiegel公式是在不考虑挡浪板反射的条件下，利用波能流守恒，采用微幅波理论推导透浪系数 K_t 。公式表达为：

$$K_t = \sqrt{\frac{2k(d-t) + \sin[2k(d-t)]}{2kd + \sinh(2kd)}} \quad (1)$$

式中： K_t 为透浪； k 为波数； d 为试验水深； t 为涵洞的入水深度。

将本文试验值与Wiegel公式计算值进行比较，结果见图8。

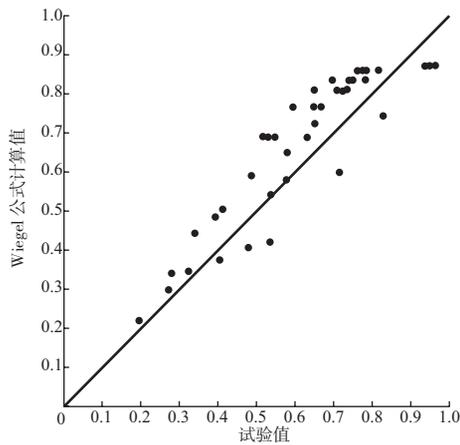


图8 透浪系数试验值与Wiegel公式计算值的比较

由图8可以看出，试验值相比Wiegel公式计算值略有偏小，这主要是防波堤堤宽对透浪系数的影响。由图3,4,6可以看出，涵洞式直立堤的相对堤身入水深度(t/d)、相对防波堤宽度(B/L_s)波陡(H_s/L_s)对透浪系数 K_t 影响较大。本研究在Wiegel公式的基础上，考虑相对堤身入水深度(t/d)、相对防波堤宽度(B/L_s)、波陡(H_s/L_s)对透浪系数 K_t 影响，对Wiegel公式进行修正，提出修正公式为：

$$K_t = K_1 K_2 K_3 \sqrt{\frac{2k(d-t) + \sinh[2k(d-1)]}{2kd + \sinh(2kd)}} \quad (2)$$

$$\text{其中：} K_1 = 1.472 \left(1 + 0.231 \times \frac{t}{d}\right) \quad (3)$$

$$K_2 = \left(1 - 2.176 \times \frac{B}{L_s}\right)^{-1} \quad (4)$$

$$K_3 = \left(1 + 32.986 \times \frac{H_s}{L_s}\right)^{-1} \quad (5)$$

式中： K_1 为相对堤身入水深度 t/d 对透浪系数 K_t 的影响系数，由于透浪系数与相对堤身入水深度 t/d 也是线性关系，所以拟定 K_1 与相对堤身入水深度 t/d 也是线性关系。同样的，可以拟定 K_2 与相对防波堤宽度 B/L_s 呈 $y=x^{-1}$ 的反比例函数曲线形式， K_3 与波陡 H_s/L_s 也呈 $y=x^{-1}$ 的反比例函数曲线形式。这样，修正公式计算值与试验值将吻合较好。将本文试验值与修正公式计算值进行比较，结果见图9。

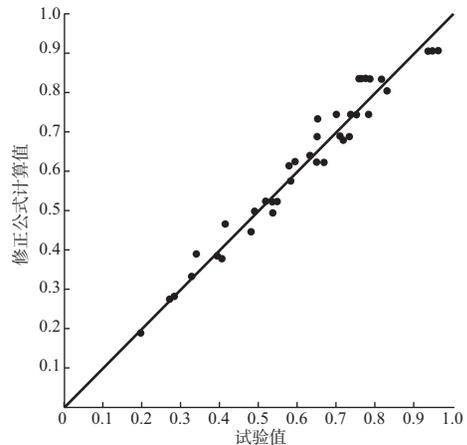


图9 透浪系数试验值与修正公式计算值的比较

修正公式属于半经验半理论公式，将图9与图8对比，可以看出修正公式的误差明显减小，公式计算值和试验值之间比Wiegel公式吻合更好，可以应用于今后类似波浪要素和结构尺度下涵洞式直立堤透浪系数的估算。

4 结论

1) 本研究通过对国内外关于透空式防波堤研究和应用的回顾，分析认为Wiegel公式较适用于涵洞式直立堤。

2) 对于涵洞式直立堤，影响透浪效果的首要因素是相对堤身入水深度 t/d ，透浪系数 K_t 随着相对堤身入水深度 t/d 的增大而减小，几乎成线性变化；其次是相对防波堤宽度 B/L_s 和波陡 H_s/L_s ，透浪系数 K_t 随着相对堤宽、波陡的增大而减小，大致

