

# 不规则波作用下潜堤透射系数试验研究

王 聪

(舟山市港航事业发展中心,浙江舟山 316021)

摘要:针对波浪通过潜堤对堤后波高影响问题,采用物理模型试验方法,对不规则波作用下相对淹没深度、相对堤顶 宽度、前后坡坡度和波陡对潜堤透射系数的影响进行研究,并根据试验数据拟合出不规则波作用下潜堤透射系数计算公式。 结果表明,相对淹没深度、相对堤顶宽度或波陡越大,透射系数越小;当坡比在1:1.0~1:2.5范围内时,前后坡坡度对潜 堤透射系数几乎无影响;对拟合公式与常用经验公式进行比较,结果表明拟合公式能较好地计算潜堤透射系数。

关键词:不规则波;潜堤;透射系数 中图分类号:U656.2+1

文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0032-06

# Experimental study on transmission coefficient of submerged breakwater under irregular wave action

WANG Cong

(Zhoushan Port and Shipping Development Center, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** Aiming at the impact of waves passing over submerged breakwater on the wave height behind the breakwater, the physical model experiment method is employed to investigate the effects of relative submergence depth, relative crest width, slope gradients of the front and back slopes, and wave steepness on the transmission coefficient of the submerged breakwater under irregular wave action. Based on the experimental data, a formula for calculating the transmission coefficient of submerged breakwater under irregular wave conditions is fitted. The results show that the transmission coefficient decreases with increasing relative submergence depth, relative crest width, or wave steepness. When the slope gradients are within the range of 1:1.0 to 1:2.5, the front and back slope gradients have almost no effect on the transmission coefficient of the submerged breakwater. A comparison between the fitted formula and commonly used empirical formulas shows that the fitted formula can calculate the transmission coefficient of submerged breakwater well.

Keywords: irregular wave; submerged breakwater; transmission coefficient

潜堤是一种常用的护岸建筑物,泛指淹没在 水中的防波堤,主要应用在近岸水深大而地基承 载能力不太强的水域。我国废黄河口海岸防护工 程、长江口深水航道整治工程和三亚三美湾海滩 整治与改造工程都应用了潜堤,其主要作用是防 浪导流、保滩促淤等。较普通防波堤而言,潜堤 造价低,具有较好的景观效果,且可以使港域内 外水体得到自由交换,从而减少水体污染。

潜堤透射系数是评价潜堤消浪效果的重要指标。

从 20 世纪 80 年代开始,国内外学者就对潜堤透射系数进行了大量的研究工作。1990 年 van der Meer<sup>[1]</sup> 采用物理模型试验,得出相对淹没水深是影响透射系数最重要的因素,并给出一次线性函数计算公式;1991 年 Daemen<sup>[2]</sup>持续 van der Meer 的研究工作,认为护面块体的透水性和堤顶宽度也是影响透射系数的因素,并且拟合了计算公式;2005 年 van der Meer<sup>[3-4]</sup>利用前人数据,拟合得到光滑结构、有斜向波作用下的潜堤透射系数公式。

收稿日期: 2024-07-19

作者简介:王聪 (1993—),男,硕士,工程师,从事在建水运工程监督管理。

1981 年杨正己<sup>[5]</sup> 通过物理模型试验提出规则波作 用下潜堤透射系数公式; 1999 年谢世楞等<sup>[6]</sup> 通过 物理模型试验,得出半圆型潜堤的透射系数计算 公式,他认为半圆型潜堤后的波高由绕射波高与 传递波高迭加而成; 2010 年邹红霞等<sup>[7]</sup> 通过物理 模型试验,研究了不规则波作用下抛石潜堤的透 射系数及堤后稳定波高的统计分布,得出不规则 波作用下潜堤透射系数经验公式。

本文基于三亚某填海工程,开展波浪整体物 理模型试验,对影响潜堤透射系数的因素进行研 究,根据试验数据,给出不规则波作用下潜堤透 射系数计算公式,并与常用经验公式进行比较, 以期为工程设计提供参考。

# 1 试验仪器和试验方法

本次物理模型试验在河海大学水资源试验大

厅波浪港池中进行,港池长 60 m,宽 40 m,高 1.2 m。港池一端安装有大连理工大学研制的多向 不规则波造波机,通过计算机控制推波板的运动 行程、频率和相位,可产生试验所需要的不同波 高、周期的正向不规则波和斜向不规则波。港池 四周设置 3 层消浪网,用于减小波浪的二次反射。 斜坡式潜堤布置在距离造波机 13 m 处,试验断面 堤心石采用砂石铺设,采用 148 g 扭王字块护面, 潜堤断面见图 1。

入射波采用不规则波,波谱为 JONSWAP 谱。 采用中国水利水电科学研究院制造的 DJ800 型多 功能数据采集系统和电容式波高仪采集波高,堤 两侧共计布置 18 根波高仪,潜堤及波高仪布置见 图 2,波高仪在试验前已率定,精度和稳定性均满 足试验要求。造波时间 300 s,采样间隔为 0.04 s, 每组波要素重复 3 次。



注: d为堤前静水位水深; a为潜堤堤顶到静水位的距离,淹没堤 a<0,出水堤 a>0; B为潜堤堤顶宽度; h为堤高; m<sub>1</sub>、m<sub>2</sub>分别为潜堤前后坡的坡度。

图 1 潜堤断面 Fig. 1 Cross section of submerged breakwater



图 2 潜堤及波高仪布置 Fig. 2 Layout of submerged breakwater and wave height gauges

#### 2 不规则波作用下各因子对潜堤透射系数的影响

2.1 影响因子分析

潜堤透射系数 K<sub>1</sub> 定义:堤后稳定有效波高 H<sub>1</sub> 与入射有效波高 H<sub>i</sub> 的比值,主要与波浪要素和潜 堤结构形式有关,斜坡式潜堤的透射系数可写为 函数:

$$K_{t} = H_{t}/H_{i} = f_{1}(H_{i}, L, d, \theta, a, B, m_{1}, m_{2}, M, \varepsilon, D_{n50})$$
(1)

式中: L 为入射波波长;  $\theta$  为波峰线与堤轴线夹角 ( $0^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$ ),当正向入射时, $\theta = 0^{\circ}$ ; M 为潜堤 护面材料;  $\varepsilon$  为堤心石孔隙率;  $D_{n50}$  为护面块石中 值粒径。 通过前人研究,认为*d* 对透射系数影响不大<sup>[8]</sup>, 本次试验未改变*d*,采用相同的*M*、*D*<sub>n50</sub> 和*ε*, 主要研究*H*<sub>i</sub>、*L*、*a*、*B*、*m*<sub>1</sub>、*m*<sub>2</sub> 对透射系数的 影响。根据无因次参数表达,式(1)可以简 化为:

 $K_{i} = H_{i}/H_{i} = f_{2}(H_{i}/L, \theta, a/H_{i}, B/H_{i}, m_{1}, m_{2})$  (2) 式中: $H_{i}/L$ 为入射波波陡; $a/H_{i}$ 为相对淹没深度; $B/H_{i}$ 为相对堤顶宽度。

试验参数及组合:水深 26.23 cm,入射有效 波高 2~12 cm,平均周期 1.1~1.8 s, *L* 为在已 知水深和平均周期下通过规范公式<sup>[9]</sup>迭代求得, 堤顶高度 10~30 cm,堤顶宽度 20~80 cm,前 坡、后坡坡比 1:1.0~1:2.5,波峰线与堤轴线夹 角 0°~50°。

2.2 相对淹没深度对透射系数的影响

相对淹没深度直接影响波浪越顶、堤前和堤 顶破碎的形态、是影响堤后波高的一个重要因素 试验分别采用 5 种相对淹没深度分析对透射系数 的影响,从图3可以看出,不同波陡情况下,透 射系数均随着相对淹没深度的增大而减小。淹没 堤和出水堤的 K, 随 a/H; 的变化趋势是不同的。当 a/H<sub>1</sub>≤-3时,堤顶水深较大,波浪越顶几乎不破 碎, 消浪效果不明显,  $K_i$  随  $a/H_i$  的增大而缓慢减 小; 当 a/H<sub>i</sub>=-3~0 时, 堤顶水深减小, 波浪在越 顶时发生部分破碎,消耗能量,消浪效果提高,  $K_i$  随  $a/H_i$  的增大而明显减小; 当  $a/H_i = 0 \sim 2$  时, 波浪大多在堤前就已经破碎,堤顶有部分越浪, 堤后波浪主要由堤顶越浪和来波透过堤身形成. 堤后波高较小, K, 随 a/H; 的增大而快速减小。当 堤顶继续抬高时,堤顶不再发生越浪,波浪在堤 前完全破碎,堤后波高仅由来波穿透堤身形成, K,可以达到0.1以下。



图 3  $K_t$  随  $a/H_i$  的变化 (B=20 cm,  $m_1=m_2=1.5$ ) Fig. 3 Variation of  $K_t$  with  $a/H_i$  (B=20 cm,  $m_1=m_2=1.5$ )

2.3 波陡对透射系数的影响

不论是出水堤还是淹没堤,  $K_1$  随  $H_i/L$  的增大 而缓慢减小, 如图 4 所示。从波浪破碎角度对该 现象进行分析, 引入一个综合系数  $\zeta_0$  (Irribarren 数, 也称破波参数)反映波浪的破碎形态<sup>[10]</sup>:

 $\zeta_0 = \tan \alpha / \sqrt{H_0 / (gT^2/2\pi)}$  (3) 式中:  $\alpha$  为前坡坡度,  $H_0$  为入射波波高, T 为周 期。可认为L,  $\zeta_0$  越小, 波浪越容易破碎, 使得波 高减小。故  $\alpha$  不变时,  $H_i/L$  越大,  $\zeta_0$  数越小, 从而 使波浪越容易破碎, 造成堤后波高减小, 即 $K_i$  减小。



图 4  $K_t$  随  $H_i/L$  的变化  $(m_1 = 1.5, m_2 = 1.5)$ Fig. 4 Variation of  $K_t$  with  $H_i/L$   $(m_1 = 1.5, m_2 = 1.5)$ 

2.4 前后坡度对透射系数的影响

从图 5 可以看出,前后坡坡比在 1:1.0~1:2.5 时, *K*<sub>1</sub> 曲线平缓,随着坡度的改变, *K*<sub>1</sub> 在 0.1 幅 度内变化,说明 *K*<sub>1</sub> 受前后坡坡度影响较小,与前 人研究结论一致。下文拟合潜堤透射系数公式时, 不考虑 *m*<sub>1</sub>、*m*<sub>2</sub> 作为影响因子。





#### 2.5 相对堤顶宽度对透射系数的影响

相对堤顶宽度也是影响潜堤透射系数的一 个 重要因素。相对堤顶宽度影响波浪越堤时的破碎 水深,随着堤顶宽度增加,波浪越堤时破碎水深 也增加;且波浪通过堤顶时间变长,消耗更多的能 量、消浪效果好。由图6可以看出,在同一H<sub>i</sub>/L和 a/H<sub>i</sub>下,总体上透射系数随着相对堤顶宽度的增 大而减小。但当波陡较小且相对淹没深度越小时, 相对堤顶宽度对透射系数的影响很小、几乎不变。 即相对堤顶宽度只有在一定 a/H; 和 H;/L 下, 才对 透射系数产生明显影响。当 a/H<sub>i</sub>≤-1.5 时,增加 堤顶宽度对减小透射系数的效果不明显。因此, 在堤顶水深越小、波浪越陡的情况下, 增加相对 堤顶宽度的消浪效果越明显。从图7还可以看出, 当堤顶宽度增加到足够大时,透射系数基本保持 不变,所以不可一味通过增加堤顶宽度来减小堤 后波高。



图 6  $K_t$  随  $B/H_i$  的变化 (h=20 cm,  $m_1=m_2=1.5$ ) Fig. 6 Variation of  $K_t$  with  $B/H_i$  (h=20 cm,  $m_1=m_2=1.5$ )

### 3 透射系数经验公式的拟合

综合以上分析,对潜堤透射系数影响较大的 因子有 H<sub>i</sub>/L、B/H<sub>i</sub>、a/H<sub>i</sub>和θ。根据前文数据分 析和经验公式结构,不考虑波浪入射角,假定淹 没潜堤透射系数计算公式为:

$$K_{i1} = 1 - k_1 \tanh(k_2 H_i / L + k_3 B / H_i) \cdot e^{k_4 a / H_i} \quad (a / H_i \leq 0)$$
(4)

式中: $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 为待定系数。

利用 MATLAB 软件,对数据进行非线性回归, 求出待定系数。拟合出正向不规则波作用下淹没 堤透射系数计算公式为:

 $K_{i1} = 1 - 0.673 \tanh(11.6H_i/L + 0.162B/H_i) \cdot e^{0.0547a/H_i}$  $(a/H_i \le 0)$  (5)

假定出水潜堤透射系数计算公式为:

K<sub>12</sub>=(K<sub>11</sub>)<sub>a/H<sub>i</sub>=0</sub>+k<sub>1</sub>e<sup>k<sub>2</sub>a/H<sub>i</sub></sup> (a/H<sub>i</sub>≥0) (6) 拟合得出正向不规则波作用下出水潜堤透射 系数计算公式为:

$$K_{12} = (K_{11})_{a/H_1 = 0} - 0.347 4 e^{0.057 7 a/H_1} \quad (a/H_1 \ge 0) \quad (7)$$

考虑到波浪入射角的折减效果,根据 van der Meer 的研究分析,假定考虑波浪入射角的透射系数  $K_{i,\theta}$  为:

$$K_{t,\theta} = K_t (\cos\theta)^{k_1} \qquad (0^\circ \le \theta \le 50^\circ)$$
(8)

受物模试验设备、模型和场地大小的限制, 本次物模试验未能采集到多个波浪入射角度变化 的数据。戈龙仔在整体模型试验中,研究了不同 入射角下,潜堤堤后的波高<sup>[11]</sup>,本文采用戈龙仔 得出的斜向波作用下堤后波高数据,拟合得出如 下经验公式:

 $K_{t,\theta} = K_t (\cos\theta)^{1.29} \qquad (0^\circ \le \theta \le 50^\circ) \qquad (9)$ 

此公式比 van der Meer 的研究成果  $K_{i,\theta}$  =  $K_i(\cos\theta)^{2/3}$  计算值偏小,是因为 van der Meer 公 式适用于斜向波作用下的光滑结构;而戈龙仔 所述潜堤断面有扭王字护面块体,因而在斜向 波作用下,堤后波高比 van der Meer 拟合的结果 偏小。

综上所述,斜向不规则波作用下潜堤透射系数计算公式如下:

$$\begin{split} K_{i1} &= [1-0.\ 673 \tanh(11.\ 6H_i/L+0.\ 162B/H_i) \cdot \\ &e^{0.\ 054\ 7a/H_i}]\cos^{1.\ 29}\theta \qquad (a/H_i \leqslant 0)\ (10) \\ K_{i2} &= [(K_{i1})_{a/H_i=0} - 0.\ 347\ 4e^{0.\ 057\ 7a/H_i}]\cos^{1.\ 29}\theta \\ &(a/H_i \geqslant 0)\ (11) \\ \vec{x} \div : \ 0.\ 04 \leqslant K_i \leqslant 0.\ 8;\ 0.\ 01 \leqslant H_i/L \leqslant 0.\ 07;\ 1.\ 6 \leqslant 0. \end{split}$$

 $B/H_{i} \leq 20; -7 \leq a/H_{i} \leq 2; 0^{\circ} \leq \theta \leq 50^{\circ}$ 

# 4 潜堤透射系数公式计算值与物理模型实测值对比

多年来,国内外学者和机构对潜堤透射系数 总结了许多经验公式,这些公式各有不同,且均有 适用条件。本文分别用 van der Meer 公式、杨正己 公式、JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[12]</sup> 推荐公式和本文拟合公式的计算值与物模实测试 验值进行对比,结果见图 7。







图 7a)为实测值与 van der Meer(2005)公式计 算值的比较。可以看出,该公式计算值普遍比实 测值大,这是因为该公式中未加入相对堤顶宽度 因子,且 van der Meer等的研究对象为低顶防波 堤,堤顶宽度较小,波浪不容易破碎,所以透射 系数较大。

图 7b)为实测值与杨正己公式计算值的比较。 可以看出,在出水堤时,该公式计算值与实测值 十分相近,拟合很好;而淹没堤时,公式计算值 普遍大于实测值,这是因为杨正己试验采用多种 护面块体,且是在规则波作用下;而本文潜堤护 面块体为扭王字块,消浪效果好,另外本文潜堤 建造在水道南口门处,入射波浪受到口门两边护 岸的反射,因此实测值比该公式计算值小。

图 7c)为实测值与规范公式计算值的比较。可以 看出,绝大多数公式计算值比实测值大,是因为规范 公式较为简单,只考虑了相对淹没深度,未考虑波陡 和相对堤顶宽度;而当堤顶水深较浅时,波陡增大或 者相对堤顶宽度增大都会使得透射系数减小,图中垂 直方向一系列的间断点就说明了这个问题。

图 7d)为实测值与本文公式计算值的比较。经计算,其相关系数为 0.86,本文公式对实测数据拟合较好,可作为有潜堤工程中透射系数的估算依据。

### 5 结论

 1)通过整体物理模型试验,分析研究了波 陡、前后坡坡度、相对堤顶宽度、相对淹没深度 和波浪入射角对潜堤透射系数的影响规律。其中 波陡、相对堤顶宽度、相对淹没深度和波浪入射 角对透射系数影响较大,前后坡坡度对其影响不 大。波陡增大,相对堤顶宽度增大,相对淹没深 度增大都会减小潜堤透射系数;随着波浪入射角 的增大,潜堤透射系数也会减小。

2)相对淹没深度对透射系数的影响最为明显, 尤其是出水堤的时候,相对淹没深度越大,透射系 数越小;当*a*/*H*<sub>i</sub>>2时,透射系数可在0.1以内。

3)得出了潜堤在不规则波作用下透射系数经 验公式。在出水堤时,推荐杨正己公式和本文公 式计算;在淹没堤时,本文公式可作为有潜堤工 程中透射系数的估算依据。

## 参考文献:

- VAN DER MEER J W. Date on wave transmission due to overtopping [R]. London: Institution of Civil Engineers, 1992.
- [2] DAEMEN I F R. Wave transmission at low-crested structures [J]. tu delft civil engineering & geosciences hydraulic engineering, 1991: 108132246.
- [3] 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(10/11): 915-929.

- [4] KRAMER M, ZANUTTIGH B, VAN DER MEER J W, et al. Laboratory experiments on low-crested breakwaters[J]. Coastal engineering, 2005, 52(10/11): 867-885.
- [5] 杨正己,贺辉华,潘少华.波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J].水利水运科学研究,1981(3):34-45. YANG Z J, HE H H, PAN S H. Stability and wave dissipation characteristics of rubble-mound breakwater under wave action [J]. Hydro-science and engineering, 1981(3):34-45.
- [6] 谢世楞,蔡艳君.半圆型潜堤后的波高分析[J].港工技 术,1999,36(4):1-3.

XIE S L, CAI Y J. Analysis of wave heights behind a submerged semi-circular breakwater [J]. Port engineering technology, 1999, 36(4): 1-3.

[7] 邹红霞,陈国平.不规则波作用下潜堤透射系数的计算 方法及统计分布[J].水运工程,2010(3):11-16.

ZOU H X, CHEN G P. Analyses on irregular wave of transmission coefficient calculation method and distribution though a submerged breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2010(3): 11-16.

[8] 李鹏. 波浪在潜堤上传播和破碎[D]. 南京: 南京水利 科学研究院, 2005.

LI P. Wave transmission and wave breaking over the submerged dike [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005.

[9] 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计 划出版社, 2013.

Code for design of levee project: GB 50286-2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

- [10] IRRIBARREN CAVANILLES R, NOGALES C. (1949).Protection des Ports[R]. Brussels: PIANC, 1949: 31-80.
- [11] 戈龙仔. 黄骅港港区起步工程波浪综合试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
  GE L Z. Comprehensive experimental research on waves in starting-stage project of Huanghua Port[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [12] 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京:人 民交通出版社股份有限公司, 2018.
  Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154– 2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd.,

2018.

(本文编辑 王传瑜)