

# 大直径圆筒结构的透浪系数研究

刘晨<sup>1</sup>, 汤子扬<sup>2</sup>, 陈国平<sup>1</sup>, 严士常<sup>1</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

**摘要:** 基于国内外桩基透空式防波堤透射系数的研究成果, 根据大直径圆筒结构的消浪机理, 确定主要试验参数和试验组次, 进行物理模型试验。经过数据处理, 得到结构的堤后波高, 明确了影响透射系数的主要因素是相对间距  $\eta$ , 次要因素是波陡  $H/L$  和相对超高  $\Delta h/H$ 。在 Hartmann 理论公式的基础上, 综合物理模型试验的数据, 拟合了透射系数的计算公式, 为今后大直径圆筒结构防波堤的设计提供了科学依据。

**关键词:** 大直径圆筒结构; 消浪效果; 透射系数; 最小二乘法

中图分类号: U 656.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0008-05

## Transmission coefficient of large-diameter cylinder structure

LIU Chen<sup>1</sup>, TANG Zi-yang<sup>2</sup>, CHEN Guo-ping<sup>1</sup>, YAN Shi-chang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Based on the research on the transmission coefficient of pile breakwater in China and abroad, and according to the wave dissipation mechanism of the large diameter cylindrical structure, we determine the main test parameters and test groups, and carry out physical model test. After data processing, we obtain the wave high over the structure, and define that the main factor affecting the transmission coefficient is the relative pitch  $\eta$ , the minor factors are wave steepness  $H/L$  and relative ultra  $\Delta h/H$ . On the basis of the Hartmann theoretical formula, and combining the data of the physical model test, we obtain the formula of transmission coefficient. This research provides a scientific basis for the design of large-diameter cylindrical breakwater.

**Keywords:** large-diameter cylinder structure; effect of wave dissipation; transmission coefficient; least squares

大直径圆筒结构的水工建筑物适用于水深较大、地基承载能力较差而波浪作用不十分强烈的水域。它容许部分波浪能量随同水体通过堤身传输到堤后, 因此, 同实体式防波堤相比, 堤身承受的波浪作用力相应减小, 对周围动力环境的影响也有所减少, 同时大直径圆筒结构可以使港域内外的水体自由交换, 使得其在港口工程的环保方面得到重视。

目前大直径圆筒透空堤在我国已有一些成功应用的经验, 施工方法相对成熟, 难度低, 施工船机少; 相比实体防波堤可大量节省砂石等工程

材料的用量; 施工速度快, 工期相对短; 靠港内一侧可作码头用, 靠泊船舶; 使用期港区的回淤量比实体式防波堤少。大直径圆筒防波堤这些特点较之实体式防波堤, 优势十分明显<sup>[1]</sup>。

对于大直径圆筒结构的水动力特性的研究, 主要的特征量为透射系数  $K_t$ ,  $K_t$  越小表示防波堤堤后波高越小, 其消浪性能也就越好。国外很多学者对这种结构消浪效果的理论研究都有着自己的见解, 推导出一系列关于该结构的理论公式。Wiegel<sup>[2]</sup> 首次尝试分析波浪与小间距桩基透空堤的

相互作用,理论认为透射系数  $K_t$  仅与桩间距有关; Hartmann<sup>[3]</sup> 的理论公式基于能量传播的方法得到; Massel<sup>[4]</sup> 考虑了入射波的散射,在 Hartmann 理论公式的基础上进行了修正; Hayashi<sup>[5]</sup> 的理论中,将波浪水体通过桩缝传播的现象看做孔口出流,同时考虑堤前水深  $d$ 、堤前波高  $H_i$  以及防波堤的空隙率  $\eta$  这 3 个因素的共同影响; Hayashi 对浅水小振幅波条件下的透射系数进行了修正<sup>[6]</sup>。本文基于前人结论做了进一步的模型试验研究。

## 1 模型设计

本次物理模型试验结合某港口大直径圆筒防波堤工程,试验在河海大学江宁校区水资源试验大厅展开,水池尺寸为  $80\text{ m} \times 40\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 。试验遵循 JTJ/T 234—2001 《波浪模型试验规范》,模型按重力相似准则设计。综合考虑试验水槽、模型大小、波浪要素以及试验仪器精度等因素,确定模型几何比尺为 1:30。防波堤的圆筒结构及防浪墙结构的外形尺寸及高程均按照设计图纸及试验比尺模拟制作。圆筒采用有机玻璃制作,筒内填充砂石满足其稳定需要。水池中装备多向不规则波造波机系统,位于水池的一端,与圆筒模型距离 50 m,通过计算机控制造波板运动的行程和频率,改变波高与周期以满足试验需要。为了减少反射对试验数据的影响,在水池远造波机一侧布置消浪措施减小影响。防波堤后均布置 3 列波高仪,用于测定堤后透射波高,采用 DJ800 型多功能数据采集系统采集试验数据(图 1)。

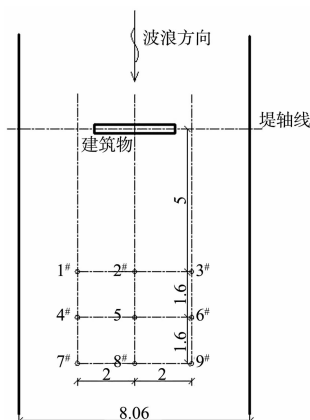


图 1 试验模型布置及测点分布 (单位: m)

试验采用潮位为 1.92、1.62、0.62、-0.18、-0.48 m,对应水深分别为 18.0、17.7、16.7、15.9、15.6 m。波高 4.62 ~ 1.00 m,周期 6.03 ~ 14.85 s。圆筒直径均采用 24 m,设置 0.3、0.5、1.0、1.7、5.0、10.0、20.0 m 共 7 种不同间距,由于试验中未考虑圆筒顶高程的影响,防浪墙顶高程均为 5.6 m。

## 2 试验结果及分析

防波堤的透射系数为堤后波高与堤前入射波高之比,即  $K_t = H_t/H_i$ 。影响大直径圆筒结构透射系数的因素比较复杂,根据前人研究经验及试验观测分析,可能对结构的消浪效果产生影响的因素有:相对间距  $\eta = b/(b+D)$  ( $b$  为圆筒间距、 $D$  为筒径)、入射波高  $H_i$ 、波周期或波长  $L$ 、堤前水深  $d$ 、堤顶超高  $\Delta h$  等,故透射系数  $K_t$  可用下列函数表示:

$$K_t = f(d, h, H_i, b, D, T, \Delta h) \quad (1)$$

将式(1)中的变量表示为无因次形式:

$$K_t = f\left(\eta, \frac{d}{L}, \frac{H_i}{L}, \frac{\Delta h}{H_i}, \frac{h}{d}, \frac{D}{H_i}\right) \quad (2)$$

由于本课题中桩径是固定的,考虑各主导因素,将  $K_t$  表达如下:

$$K_t = f\left(\eta, \frac{d}{L}, \frac{H_i}{L}, \frac{\Delta h}{H_i}\right) \quad (3)$$

### 2.1 相对间距 $\eta$ 对透射系数的影响

由于试验数据中部分组次有越浪,为了排除越浪水体对分析产生的干扰,将试验数据按照有无越浪分成两个部分进行后续分析。

从图 2 可以清楚地发现,透射系数  $K_t$  与相对间距  $\eta$  有着明显的关系,且与 Hartmann 公式的值基本相近,验证了之前的想法。所以相对间距  $\eta$  是透射系数的主要影响因素,  $K_t$  与  $\eta$  的关系基本可以用 Hartmann 公式的形式表示。

### 2.2 相对水深 $d/L$ 对透射系数的影响

从图 3 可以看到,  $K_t$  与相对水深  $d/L$  之间的关系大致为:透射系数  $K_t$  随着相对水深  $d/L$  的逐渐增大而渐渐减小,且随着  $d/L$  的增大,  $K_t$  减小的速度越来越快,但由于其中水深没有变化,主要

产生影响的因素为波长  $L$ 。但  $K_t$  的变化范围有限,  $d/L$  属于次级影响因素。

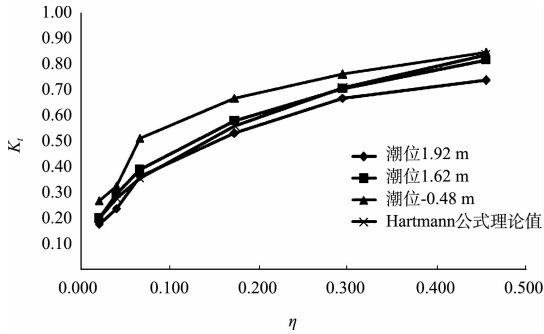


图 2  $K_t$  随相对间距  $\eta$  的变化 ( $H_s = 2.7 \text{ m}$ ,  $T_m = 11.6 \text{ s}$ )

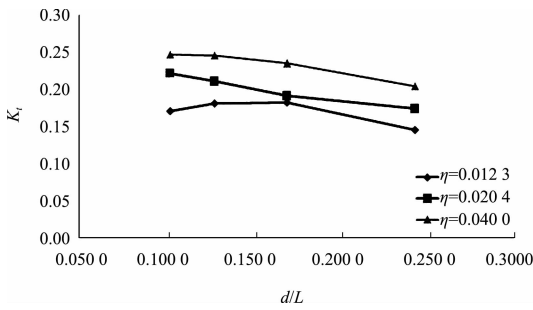


图 3  $K_t$  随相对水深  $d/L$  的变化 ( $H_s = 3.85 \text{ m}$ , 潮位 1.92 m)

除此之外,也可以清晰地发现 Hartmann 公式的不足之处:在相同的相对间距  $\eta$ 、水深  $d$ 、波高  $H$  的条件下,不同波周期波浪的实际透射系数是有着明显差异的,而理论计算值是相同的,因次有必要在理论计算中考虑波长对透射的影响。

### 2.3 波陡 $H/L$ 对透射系数的影响

从图 4 可以得到:透射系数  $K_t$  随着波陡  $H/L$  的增大而缓慢增大,但变化不是很明显,即  $H/L$  对透射系数  $K_t$  的影响不甚重要,属于次级影响因素。

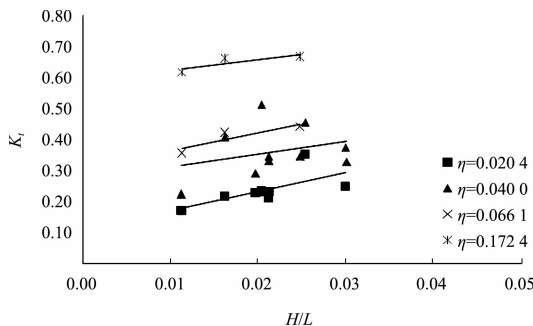


图 4  $K_t$  随波陡  $H/L$  的变化 (潮位: 0.62 m)

### 2.4 相对超高 $\Delta h/H$ 对透射系数的影响

从图 5 可以清楚地看出:透射系数  $K_t$  随着相对超高  $\Delta h/H$  的增大而逐渐增大,但是变化幅度不是很大,且由于数据有限,点位相对比较松散,故  $\Delta h/H$  对透射系数  $K_t$  的影响不甚重要,也属于次级影响因素。

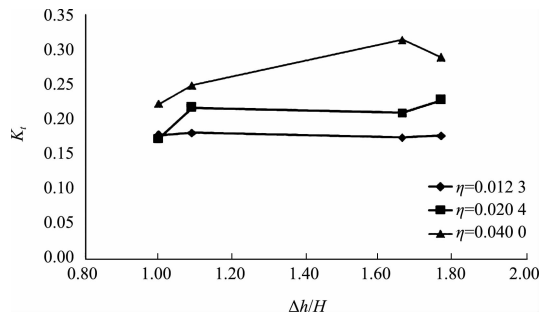


图 5  $K_t$  随相对超高  $\Delta h/H$  的变化 ( $H_s = 3.60 \text{ m}$ ,  $T_m = 9.5 \text{ s}$ )

参考以往文献对小直径桩基结构的分析,随着相对超高  $\Delta h/H$  的增大,会使得透射系数  $K_t$  有一定的减小,而本次试验得到的结果与之恰恰相反。参考本次物理模型试验的现象,可以发现,大直径结构越浪水体作用在堤后的形式与小直径桩基是有所不同的。小直径结构中,水体越过建筑物直接作用于堤后水域,会产生较大波动。而在大直径结构中,越过防浪墙的水体首先砸在圆筒的面板上,然后产生漫流从圆筒四周流入堤后水域,产生的次生波对堤后水域的扰动是很小的。这种越浪形式大大减小了越浪水体的能量,起到了一定的消浪效果。本次试验中有越浪的组次所占比重较大,随着堤顶超高逐渐变小,从堤顶越过去的水体所占的比重也越来越大,由于越浪损耗的能量也越大,故当圆筒的直径足够大的时候,随着相对超高的增大,透射系数也有增大的趋势,但影响有限,属于次级影响因素。

### 3 经验公式的拟合

根据上述试验结果的图表,结合各因子对透射系数  $K_t$  的影响程度,可以确定影响大直径圆筒结构的透射系数  $K_t$  的主要因素为相对间距  $\eta$ ,而  $H/L$ 、 $\Delta h/H$  为次要影响因素,即公式可以表示为:

$$K_t = f\left(\eta, \frac{H_i}{L}, \frac{\Delta h}{H_i}\right) \quad (4)$$

将本次试验结果与各家经典公式计算值进行对比, 得到以下结果:

由图 6、表 1 可知, Wiegel 理论公式的计算值与试验值的误差相对比较大, 相比试验值, 理论值偏大许多, 平均误差达到 79.54%, 且 Wiegel 公式仅仅考虑了相对间距  $\eta$  这一单一变量。Hartmann 理论公式的计算值与试验值的误差相对较小, 相关系数为 0.966 78, 平均误差为 12.81%, 拟合良好, 但由于 Hartmann 公式中也只考虑了相对间距  $\eta$  对透射系数的影响, 需进行进一步的修正。Massel 理论公式的计算值与试验值的误差也相对较大, 理论值普遍大于计算值, 平均误差达到 86.61%。Hayashi 理论公式的计算值与试验值的相关系数为 0.971 88。公式在相对间距外还考虑了入射波高  $H_i$ 、周期  $T$ 、堤前水深  $d$  等因素的共同影响, 考虑因素较广, 但理论值和试验值的误差稍显偏大, 平均误差为 34.12%。而 Hayashi 修正公式误差相对较大, 理论值普遍大于计算值, 平均误差达到 50.82%。

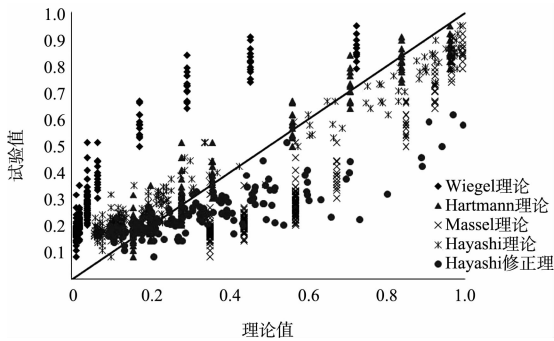


图 6 各经典公式计算值与试验值比较

表 1 各家经典公式理论值与试验值误差

公式	相关系数	平均误差/%
Wiegel	0.858 3	79.54
Hartmann	0.966 8	12.81
Massel	0.943 7	86.61
Hayashi	0.971 9	34.12
Hayashi 修正	0.889 9	50.82

综上所述以上几个公式的拟合结果, Hartmann 理论公式的计算值与试验值吻合较好, 且公式形

式简单。但是考虑的影响因素过于简单, 只考虑了相对间距  $\eta$  对透射系数的影响。本次试验将在 Hartmann 理论公式的基础上考虑波陡  $H/L$  以及相对超高  $\Delta h/H$  对透射系数的影响, 利用最小二乘法, 进行非线性拟合。

假定透射系数的公式形式如下:

$$K_t = \sqrt{1 - \left[1 - k_1 \left(\frac{L}{H}\right)^{k_2} \left(\frac{\Delta h}{H}\right)^{k_3} \eta\right]^2} \quad (5)$$

将本次所有的试验数据代入上式, 拟合结果如下:  $k_1 = 0.620$ ,  $k_2 = 0.115$ ,  $k_3 = 0.270$ 。

此公式的适用范围为:

$$\begin{cases} 0.012 \leq \eta \leq 0.724 \\ 0.102 \leq \frac{d}{L_s} \leq 0.339 4 \\ 0.623 \leq \frac{\Delta h}{H_s} \leq 8.653 \\ 0.120 \leq \Delta h/D \leq 0.741 \end{cases} \quad (6)$$

图 7 中, 横坐标为本文公式计算值, 纵坐标为本次试验的所有试验值, 相关系数为 0.982 2, 平均误差为 11.64%, 均方差为 0.064 3。拟合公式在原公式的基础上扩充了影响因素, 扩大了公式的适用性, 且能很好地符合精度要求。可以在今后类似波浪要素和结构尺度下, 估算大直径圆筒结构的透射系数。

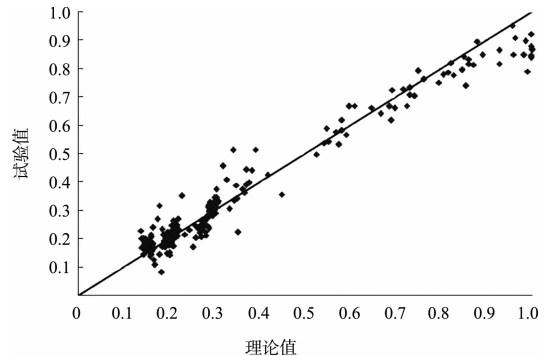


图 7 本文公式计算值与试验值比较

#### 4 结论

对大直径圆筒结构的透射系数影响最大的因素为防波堤的相对间距, 其对结构的透浪效果起到决定性的作用,  $K_t$  会随  $\eta$  的增大而增大。除此之外, 波长  $L$ 、堤顶相对超高  $\Delta h$  对其透浪效果也有着不可忽略的影响。

与小直径桩基结构不同的是,当越浪水体超过大直径圆筒结构的时候,水位首先作用在圆筒面板上,消耗掉一部分透过防波堤的能量,故当圆筒直径足够大时,堤顶的越浪反而会使透射系数相对减小。

根据对各因素的分析,本文在 Hartmann 公式的基础上对其做了进一步修正,能较好地估算大直径圆筒结构的透浪系数。

大直径圆筒结构透射系数的研究与工程实际联系紧密,试验研究的实际意义十分重大。

**参考文献:**

[1] 中交第四航务工程勘察设计院. 长江口深水航道治理工程大直径圆筒结构试验段工程总结报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院, 2002.

[2] Wiegel, Robert L. Closely spaced piles as a breakwater[R]. California: California University Berkeley Hydraulic Engineering Laboratory, 1961.

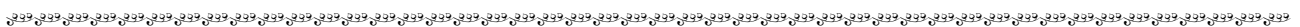
[3] 王瑜. 浅水小波高条件下桩式透空堤消浪效果研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.

[4] Massel S R. Interaction of water waves with cylinder barrier[J]. Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division, 1976, 102(2): 165-187.

[5] Hayashi T, Hattori M, Shirai M. Closely spaced pile breakwater as a protection structure against beach erosion[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1968, 1(11): 606-621.

[6] Hayashi T, Kano T. Hydraulic research on the closely spaced pile breakwater[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1966, 1(10): 873-884.

(本文编辑 武亚庆)



**· 消 息 ·**

**中交建集团公司获全国技能人才表彰奖大满贯**

近日,人力资源和社会保障部公布了第十二届全国技能人才评选表彰结果。经过激烈比拼,中交建获 3 项大奖,实现了在国家技能人才评选表彰中的大满贯。

在本届国家技能人才评选表彰中,二航局陶建飞、三航局张宜兵荣获“全国技术能手”荣誉称号;二航局获评“国家技能人才培育突出贡献奖”(单位);中国交建人力资源部(集团鉴定中心)楼勇获评“国家技能人才培育突出贡献奖”(个人)。其中,“国家技能人才培育突出贡献奖”(个人)为公司在国家技能人才评选表彰中首次获得。本届表彰共评出“全国技术能手”300人,在没有名额指标分配的公开竞争性评选中,共评出突出贡献单位 84 家、突出贡献个人 80 人。

公司一直以来高度重视技能人才培养工作,采取各种有效措施大力开展职业技能鉴定、职业技能竞赛及技能人才评优选拔等工作,培养了一大批技能精湛的优秀高技能人才,技能人才队伍的整体素质和技能水平得到了稳步提升,为企业的改革发展发挥了重要的人才保障作用。在“十二五”期间国家技能人才表彰中,公司共获评“中华技能大奖”荣誉称号 1 人;“全国技术能手”荣誉称号 4 人;2 家单位荣获“国家技能人才培育突出贡献奖”(单位);获评“国家技能人才培育突出贡献奖”(个人) 1 人,圆满完成了公司优秀高技能人才培养任务目标,为企业技能人才工作起到了强力的示范引领和带动作用。

(摘编自《中国交通建设网》)