



## 考虑护面块体影响的越浪数值模拟\*

郭立栋<sup>1</sup>, 孙大鹏<sup>2</sup>, 王 鹏<sup>3</sup>, 黄明汉<sup>4</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011; 4. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222)

**摘要:** 为了在斜坡堤数值计算中考虑护面块体的影响, 借鉴海绵阻尼层的消波方式, 在湍流模型的控制方程中引入等效护面块体系数 $\mu^*$ 的概念, 并将等效系数 $\mu^*$ 与规范中常用的糙渗系数 $K_\Delta$ 相联系, 构建了基于糙渗系数 $K_\Delta$ 求解等效系数 $\mu^*$ 的数值转换途径。该方法拓展了波浪数值模型的应用范围, 在波浪与结构物相互作用的数值研究方面具有新意。

**关键词:** 数值模型; 护面块体; 等效系数; 糙渗系数

中图分类号: TV 871

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0032-04

### Numerical simulation of wave overtopping considering effect of armor blocks

GUO Li-dong<sup>1</sup>, SUN Da-peng<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>, HUANG Ming-han<sup>4</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. ChangJiang Waterway Institute of Planning, Design & Research, Wuhan 430011, China;

4. Tianjin Port Engineering Institute Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** To consider the effect of the armor blocks, the numerical damping absorber is used for reference. In the study, the equivalent friction coefficient  $\mu^*$  introduced into the governing equations can be converted from the roughness coefficient  $K_\Delta$ , which has been built link with the roughness coefficient  $K_\Delta$  in standard. The idea expands the application range of numerical model of wave, and it's novel in the study of wave and structure interactions.

**Key words:** numerical model; armor blocks; equivalent friction coefficient; roughness coefficient

斜坡式防波堤是一种常见的海岸结构物, 能够有效地阻止波浪对堤后的侵袭。在实际工程中, 斜坡堤的堤前均铺设护面块体。护面块体是抛筑在护面层上以保证堤身在波浪作用下稳定的各种特定形状的混凝土块体, 具有重心低、稳定性好、施工方便、护面平整美观等优点, 常见的护面块体结构形式<sup>[1]</sup>主要有实心式、空心式和杆件式。

护面块体是斜坡堤的重要组成部分, 一方面通过护面层的空隙和表面粗糙度形成紊流消能, 降低波浪爬高; 另一方面靠块体的自重和块体间

的咬合、嵌固作用抵御正面波浪冲击力和上浮力, 提高护面层的稳定性。因此, 在斜坡堤的物理模型试验及数值模型计算中均无法忽视护面块体的作用。

目前, 对于带护面块体斜坡堤的湍流数值研究多采用多孔介质模型<sup>[2]</sup>, 该模型是通过雷诺时均方程(RANS)中引入渗透介质理论得到的。Arikawa等<sup>[3]</sup>采用考虑多孔介质作用的RANS方程建立了VOF二维数值波浪水槽, 对越堤水体与堤后结构物的流体作用力进行研究。张久山等<sup>[4]</sup>在

收稿日期: 2013-08-13

\*基金项目: 国家自然科学基金(50921001), 海岸和近海工程国家重点实验室基金(LP0804)

作者简介: 郭立栋(1981—), 男, 博士, 工程师, 从事海岸与近海工程方面的研究和管理工作的。

FLUENT 软件平台基础上,将多孔介质模型作为耗散源项添加到动量方程中,模拟了斜坡堤上铺设护面块体时的越浪过程,并给出越浪量。

波浪多孔介质湍流模型,是可以对斜坡堤上的护面块体进行数值模拟的,但方程中引入了体积单元孔隙率  $\gamma_v$ 、惯性力系数  $C_M$  和拖曳力系数  $C_D$  等系数,使得计算较为复杂,并且这些系数的选取均是经验性的,不便于数值计算的使用。为了确定上述阻力系数,张久山等<sup>[4]</sup>进行了典型工况的物理模型试验,并与数值计算的越浪量结果进行比较,从而得到了某种护面块体在不同位置处的阻力系数。可知,一方面随着斜坡堤结构形式与护面块体区域的变化,其所得到的系数必定是不同的,因此该系数不具备一定的通用性;另一方面,将物理模型试验作为验证手段,投资较

大、周期也较长。

本文在湍流数值模型基础上,借鉴海绵层阻尼的消波方式,将护面块体区域等效为阻尼层,在湍流模型的控制方程中引入等效护面块体系数  $\mu^*$  概念,并将等效系数与规范中常用的糙渗系数  $K_\Delta$  相联系,构建了基于糙渗系数求解等效系数的数值转换途径。

## 1 护面块体湍流模型

在斜坡堤的湍流数值模型计算中,需要考虑护面块体所产生的影响。为了简化护面块体区域的计算,本文借鉴海绵层阻尼的消波方式,在湍流控制方程中直接引入等效护面块体系数  $\mu^*$ ,因此在该区域内的流体将采用修正后的 RANS 方程进行计算,其表达式为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial v_t \partial u}{\partial x \partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} - \mu^* u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial v_t \partial v}{\partial z \partial z} + \frac{\partial v_t}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} - \mu^* v \quad (2)$$

式中:  $u, v$  分别为流体的  $x$  与  $z$  方向的速度分量;  $p$  为压力;  $\rho$  是流体密度;  $\nu_t$  为流体运动黏性系数,  $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$  为湍流黏性系数; 等效护面块体系数  $\mu^*$  为常数 (非护面块体区域  $\mu^* = 0$ )。由公式可知,建立护面块体湍流数值模型的难点就在于  $\mu^*$  的率定。

## 2 等效护面块体系数的率定

在波浪爬坡和越浪的实际工程计算中均需要考虑护面块体的影响。为了得到不同等效护面块体系数,本文从波浪爬坡与越浪的经验公式出发,寻找两者之间的联系。现有的波浪爬高和越浪量经验公式,是通过大量的物模试验总结归纳得到的。

相比于波浪爬高,越浪所涉及到的波浪水动力问题更为复杂,它的影响因素也更多。斜坡堤的结构形式例如胸墙高度、平台宽度、平台超高和外堤坡度等都会对越浪量产生明显的影响。所以,越浪量经验公式的获取难度较大,公式的适用性也受到一定的限制。而波浪爬高公式形式简单、适用性强、计算精度也比较好。

### 2.1 计算爬高的经验公式

1) 《堤防工程设计规范》法 (莆田法)。

$$R_F = \frac{K_\Delta K_v K_p}{\sqrt{1+m^2}} \sqrt{HL} \quad (3)$$

式中:  $K_\Delta$  为斜坡的糙率透渗系数;  $K_v$  是与  $v/\sqrt{gd}$  相关的经验系数,  $v$  是风速,  $d$  为堤前水深;  $K_p$  为爬高累计频率换算系数;  $m$  为斜坡坡率;  $\bar{H}$  为堤前平均波高;  $L$  为堤前波浪的波长。

2) 前苏联规范法。

$$R_{1\%} = K_1 K_2 K_3 K_4 H_{1\%} \quad (4)$$

式中:  $R_{1\%}$  为累积频率为 1% 的爬高;  $K_1, K_2$  为坡面糙率系数和渗透系数,  $K_1 K_2$  的值即相当于式 (3) 中的  $K_\Delta$ ;  $K_3, K_4$  为与风速及堤前水深相关的经验系数。

3) 《港口工程技术规范》法。

$$R = K_\Delta K_d R_0 H \quad (5)$$

式中:  $K_\Delta$  是与斜坡护面结构形式有关的糙渗系数;  $K_d$  是水深校正系数;  $R_0$  为  $K_\Delta = 1, H = 1$  m 时的波浪爬高。

4) 《海港水文规范》法。

$$R = K_{\Delta} R_1 H \quad (6)$$

式中： $K_{\Delta}$  为斜坡的糙渗系数， $R_1$  同式(5)中的  $R_0$ 。由式(6)可知，在波高一定的情况下，可认为爬高与糙渗系数  $K_{\Delta}$  成线性关系。

由式(3)~(6)可知，在波浪爬高的经验公式

中，均采用了同一个参数（斜坡的糙渗系数  $K_{\Delta}$ ）对不同护面块体的影响进行描述。工程中为确定某一种护面形式的波浪爬高，通常先计算光滑不透水斜坡的越浪量  $R_1$ （该波况最大越浪量），再乘上考虑糙渗影响的折减系数。不同公式中的  $K_{\Delta}$  值也基本相似，见表1。

表1 各种护面块体对应的  $K_{\Delta}$

护面结构形式	$K_{\Delta}$	护面结构形式	$K_{\Delta}$
整片光滑不透水护面	1	混凝土护面	0.9
砌石	0.75 ~ 0.80	块石(安放一层)	0.60 ~ 0.65
四角空心方块(安放一层)	0.55	块石(抛填两层)	0.50 ~ 0.55
混凝土方块(抛填两层)	0.50	四角锥体(安放两层)	0.40
工字型块体(安放两层)	0.38		

## 2.2 计算越浪量的经验公式

1) 《海堤工程设计规范》推荐公式。

$$\frac{q}{THg} = A \exp\left(-\frac{B}{K_{\Delta}} \cdot \frac{H_c}{T\sqrt{Hg}}\right) \quad (7)$$

式中： $K_{\Delta}$  为糙渗系数，取值也采用表1中的推荐值； $q$  为越浪量 ( $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )； $H_c$  为堤顶在静水面以上的高度； $T$  为波浪平均周期； $A, B$  均为与  $m$  有关的经验系数。

2) 荷兰越浪量计算的公式。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_0 \exp\left(-\frac{4.3R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_{\beta} \gamma_v}\right) \quad (8)$$

式中： $q$  为平均越浪水量 ( $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )； $\alpha$  为前坡与水平面的夹角； $R_c$  为堤顶超高； $\gamma_b$  为平台折减系数； $\gamma_{\beta}$  为波浪斜向入射系数； $\xi_0$  为波浪破碎参数， $\xi_0 = \tan\alpha / \sqrt{\zeta_0}$ ， $\zeta_0$  为波陡， $\zeta_0 = 2\pi H_{m0} / (gT_{m-1.0}^2)$ ， $H_{m0}$  是堤脚处的波高， $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$ ， $T_{m-1.0}$  是波谱周期， $T_{m-1.0} = m_{-1} / m_0$ ， $m_0$  为零谱矩，量纲为  $m^2$ ， $m_{-1}$  为一阶负谱矩，量纲为  $m^2 \cdot s$ ； $\gamma_v$  为防浪墙影响系数； $\gamma_f$  是糙率影响系数（取值范围 0.5 ~ 1.0），仅给出了草皮、碎石、混凝土面等护面形式的影响系数，而对于工程中常用的四角空心方块、扭工字块、扭王字块等却没有给出可参考的值。

从上述波浪爬高和越浪量的经验公式中发现，对于护面块体的影响，均采用了糙渗系数  $K_{\Delta}$  来进行描述，相同护面块体的  $K_{\Delta}$  值也非常相近甚至完

全相同。不同的是，在这些公式中， $K_{\Delta}$  与爬高均成线性关系，而与越浪量均成指数关系。因此， $K_{\Delta}$  即是联系爬高和越浪量计算的纽带。

所以，本文越浪量计算的过程为：1) 确定越浪计算的波况，并认定由《海港水文规范》法式(6)计算的爬高值足够精确，取  $K_{\Delta} = 1$ （即不考虑护面块体作用）计算出该波况理论上的最大爬高值  $R_1$ 。2) 在湍流模型的护面块体区域中，通过改变等效系数  $\mu^*$  的取值，计算出该波况不同系数下的爬高值  $r$ 。由于糙渗系数  $K_{\Delta}$  与爬高的线性关系，则  $r/R_1$  的值即为  $K_{\Delta}$ 。3) 将等效系数  $\mu^*$  与计算得到的相应的  $r/R_1$  ( $K_{\Delta}$ ) 值绘制在图表上，数值拟合后得到两者间的关系曲线。4) 通过查图表即可找到不同护面块体在该波况下所对应的等效系数，将等效系数代入式(1)和(2)中就能计算出各种护面块体下的越浪量。

因此，在得到某种护面块体的等效系数  $\mu^*$ ，并将其引入数值模型的控制方程中后，即可对相同波况的越浪进行模拟。而数值模拟具有信息获取全面、计算灵活的优点，在越浪计算中可以设定不同的斜坡堤结构形式（单坡、复坡；有无胸墙等）和不同的波浪形态（规则波、不规则波）等，所以，该方法具有非常广的适用范围。

## 3 算例

为了计算波高  $H = 1$  m，周期  $T = 3.58$  s，水深  $d = 3.4$  m（波长  $L = 20$  m），平台超高  $H_r = 0$ ，平台宽

度  $B=0.8\text{ m}$ , 坡度  $m=1.5$  波况下的越浪量, 首先计算该波况下采用不同系数时的爬高值。图1给出了等效系数  $\mu^*$  与  $r/R_1$  的关系, 横坐标  $r/R_1$  代表各系数下的爬高值与理论最大爬高值(即不考虑护面块体作用,  $\mu^*=0$ ) 的比值, 也是糙渗系数  $K_\Delta$  的值。

由图1可见, 糙渗系数  $K_\Delta$  与等效系数  $\mu^*$  呈二次曲线关系, 图中曲线的拟合度为  $R^2=0.987$ 。图中  $r/R_1$  即糙渗系数  $K_\Delta$  的值均都在  $0.3\sim 0.9$ , 这是符合实际情况的。本文将计算上述波况下, 斜坡堤上分别铺设块石(安放1层)和工字型块体(安放2层)时的越浪量。通过查表1, 选取对应的护面块体糙渗系数  $K_\Delta$  分别为  $0.65$  和  $0.38$ , 再由图1即可得到铺设这两种护面块体时的等效系数, 分别为  $0.686$  和  $0.952$ 。将这两个值代入式(1)和(2)就能进行相应护面块体的越浪计算。

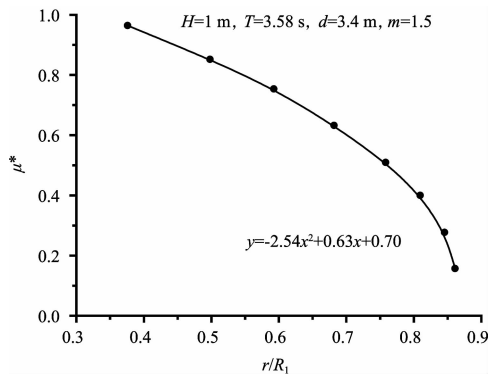
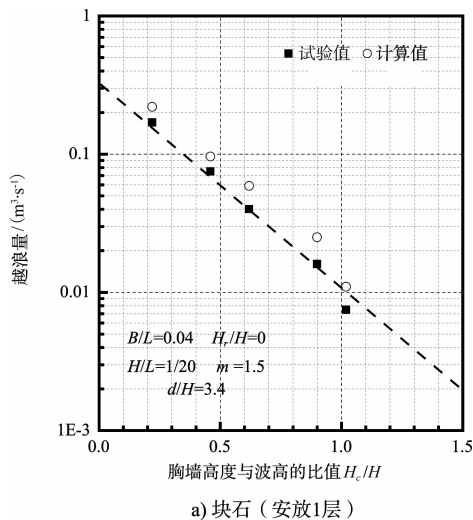


图1 糙渗系数  $K_\Delta$  与等效系数  $\mu^*$  的关系

图2是铺设块石(安放1层)和工字型块体(安放2层)时的越浪量计算值与贺朝敖等<sup>[5]</sup>试验值的对比情况。



a) 块石(安放1层)

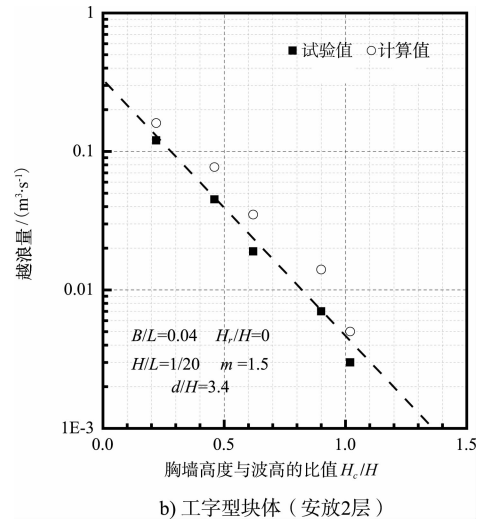


图2 护面块体对越浪量影响

由图2可见, 这些关系点均集中在对数坐标的直线上, 且离散性较小; 相同计算条件下, 随着护面块体糙渗系数的减小, 越浪量则变小; 本文计算值与试验值吻合较好。

综上所述, 本文借鉴海绵层阻尼的消波方式, 在控制方程中引入等效护面块体系数  $\mu^*$ , 建立了可考虑护面块体的湍流数值模型。在给定波况下, 通过计算爬高值, 将规范中常用的护面块体糙渗系数  $K_\Delta$  与数模中的等效系数  $\mu^*$  相联系, 最终求得等效系数并用于相同波况的越浪数值模拟。这种越浪量计算方法将不受波浪形态和斜坡堤结构形式的限制, 其对越浪计算的适用性是经验公式所无法比拟的。

#### 4 结论

本文建立的考虑护面块体的数值模型将数值模型研究与设计规范联系在一起, 构建了基于护面块体糙渗系数  $K_\Delta$  求解等效系数  $\mu^*$  的数值转换途径, 在波浪与结构物相互作用的数值研究方面具有新意。在给定波况下, 只需确定等效系数, 就可以对不同结构形式与护面块体区域的斜坡堤进行越浪模拟。本文考虑护面块体的湍流模型简单易行、适用性广、通用性强, 在实际工程中具有良好的应用前景。

(下转第40页)