



## 堤顶越浪计算中粗糙系数的 神经网络模型预测\*

赵笑影<sup>1,2</sup>, 董平<sup>1,2</sup>, 李岩<sup>1,2</sup>, 赵辛奥<sup>1,2</sup>, 战超<sup>1,2</sup>, 王庆<sup>1,2</sup>

(1. 鲁东大学水利土木学院, 山东烟台264025; 2. 山东省河口海岸与核环境重点实验室, 山东烟台264025)

**摘要:** 防波堤结构的块体护面通过摩擦和渗透作用消耗入射波的能量, 从而减少波浪越浪。现有大多越浪计算方法均采用一个与块体类别相关的常值粗糙系数, 无法反映不同护面块体结构参数的影响。为了评估越浪机器学习模型中输入的常值粗糙系数的合理性, 利用欧盟 CLASH 项目提供的越浪数据库, 选取单坡堤(包括简单单坡堤、带胸墙的单坡堤、带堤顶平台的单坡堤和复合单坡堤)的越浪、波浪和结构参数数据, 构建了拟合块体护面粗糙系数的神经网络模型。通过对比不同结构形式模型的拟合程度, 评估了数据库中推荐的块体粗糙系数值对越浪神经网络预测模型的适用性。研究发现, 模型拟合精度会因斜坡堤结构的不同而表现出显著的差异性, 表明目前采用的常值粗糙系数具有很大的局限性和不确定性。为了进一步提高越浪神经网络模型精度, 模型输入参数需要增加反映对水动力有直接影响的块体特征参量。

**关键词:** 块体护面; CLASH 项目; 粗糙系数; 单坡堤; 神经网络

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0031-10

### Neural network-based model prediction of roughness coefficient used for overtopping calculations

ZHAO Xiaoying<sup>1,2</sup>, DONG Ping<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin'ao<sup>1,2</sup>, ZHAN Chao<sup>1,2</sup>, WANG Qing<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. Shandong Key Laboratory of Estuary and Coast & Nuclear Environment, Yantai 264025, China)

**Abstract:** The armor layer of a breakwater dissipates wave energy through friction and percolation, thereby reducing wave overtopping. Most existing overtopping calculation methods employ a constant roughness coefficient related to armor block type, which fails to account for the influence of different structural parameters of the armor layer. To evaluate the rationality of using constant roughness coefficients as input in machine learning models for wave overtopping prediction, this study utilizes the overtopping database from the EU CLASH project. Data for single-slope breakwaters (including simple slopes, slopes with crown walls, slopes with berms, and composite slopes) encompassing overtopping, wave, and structural parameters are selected to develop a neural network model for fitting armor layer roughness coefficients. By comparing the model performance across different structural types, the applicability of the recommended roughness coefficients in the database for neural network-based overtopping prediction is assessed. The results reveal significant variations in model accuracy depending on the breakwater slope structure, indicating substantial limitations and uncertainties in the current practice of using constant roughness coefficients. To further enhance the precision of neural network models for overtopping prediction, input parameters should incorporate armor block characteristics that directly influence hydrodynamic performance.

**Keywords:** armor layer; CLASH project; roughness coefficient; single-slope breakwater; neural network

收稿日期: 2025-05-25 录用日期: 2025-07-02

\*基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52401329); 国家自然科学基金重点项目(42330406); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2023QE310); 山东省基地和人才计划项目(WSR2023026)

作者简介: 赵笑影(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水利工程。

通信作者: 董平(1958—), 男, 博士, 教授, 研究方向为海洋洋流、海岸动力地貌、波浪结构与底床相互作用。

E-mail: bb0071226@outlook.com

斜坡防波堤是海岸防护的重要设施,其主要功能是抵御波浪对海岸结构物的冲击,降低沿岸低地遭受水淹的风险。随着全球气候变暖,极端天气事件(如特大暴雨和风暴潮)频发,研究表明,中国近海海平面呈加速上升趋势,1993—2021年上升速率为3.8 mm/a,高于全球同期平均水平(3.3 mm/a)。在SSP5-8.5(shared socioeconomic pathways,共享社会经济路径)高排放情景下,2100年中国近海海平面可能上升0.64~1.09 m,这将导致现有100 a一遇极端海面事件的重现期显著缩短,超过50%的站点可能变为不足2 a一遇<sup>[1]</sup>,这种变化将直接影响防波堤波浪越浪的频率和越浪量。

由于粗糙或透水坡面有更大的消能效果,很多防波堤采用了天然块石或人工块体护面,用以降低堤面上的越浪<sup>[2]</sup>。这一消能作用通常由在相应光滑斜坡堤的经验公式中引入一个数值小于1的粗糙系数来实现。斜坡堤的粗糙系数研究始于Owen<sup>[3]</sup>的开创性工作。在针对简单斜坡波浪爬坡和越浪的试验研究中,Owen首次引入粗糙系数 $\gamma_f$ 的概念,定义为特定波浪在粗糙斜坡上的爬升高度与光滑斜坡上爬升高度的比值,用来确定粗糙表面对波浪爬坡高度和越浪量的降低程度。van der Meer<sup>[4]</sup>沿用这一粗糙系数概念,提出天然块体护面斜坡堤越浪的经验公式。EurOtop<sup>[5]</sup>手册根据块体类型和排布给出了相应的粗糙系数值,并建议在设计中使用这些系数来估算波浪越浪量。然而,这些静态粗糙系数值忽略了防波堤结构特征和水动力的影响。Molines等<sup>[6]</sup>基于欧洲CLASH(crest level assessment of coastal structures by full-scale monitoring)项目的数据研究了非破碎波条件下混凝土护面块体的粗糙系数,发现其与波陡和相对堤顶超高存在非线性相关关系。van Gent等<sup>[7]</sup>进一步揭示堆石堤粗糙系数不仅受波浪破碎参数影响,还与波浪周期、堤顶宽度密切相关。此外,许建武等<sup>[8]</sup>研究得出护面块体的布设方式(如随机抛放与规则摆放)影响空隙率,间接影响粗糙系数。这些研究表明,粗糙系数不仅与波陡、坡角及结构参数(如堤顶宽度、堤顶超高)存在非线性相关,

还会受到护面块体的布设方式与块体间空隙的影响。粗糙系数不应该被看作为静态参数,而应该与护面块体的几何形状、护面层的孔隙率、层数等结构特性以及波浪特性有相关关系。

近年来,机器学习预测模型被广泛应用于防波堤越浪的预测,利用大量波浪要素和防波堤结构特征及越浪数据,建立了各种预测越浪的机器学习模型。如van Gent等<sup>[9]</sup>基于CLASH数据库开发了适用于一般复合斜坡堤越浪的神经网络模型,该模型的输入参数集不仅包括斜坡结构、波浪和水深参数,粗糙系数也是一个关键输入参数。国内学者也基于CLASH数据库开展了大量关于斜坡堤越浪预测的研究,黄建等<sup>[10]</sup>构建了适用于不同类型海堤(包括斜坡堤、直立堤和混合堤)越浪预测的神经网络模型。胡原野等<sup>[11]</sup>分别构建了集成神经网络(ENN)、随机森林(RF)两种机器学习模型进行对比。这些模型的输入集均包含数据库提供的静态粗糙系数。Zanutigh等<sup>[12]</sup>和Formentin等<sup>[13]</sup>在van Gent模型基础上增加了块体尺度的影响,但仍然输入了同样的 $\gamma_f$ 值。

然而,与通常经验公式不同,机器学习模型预报方法是基于数据训练,并不依赖于物理量之间的已知特定关系或可能的统计联系。考虑到 $\gamma_f$ 可以被看作一个综合反映块体影响的参数,其取值的可靠性也可以用机器学习方法评估。在相关领域,机器学习方法已经被用于预测各种条件下的粗糙系数。例如,Samadianfard等<sup>[14]</sup>通过基因表达式编程(GEP)、自适应神经模糊推理系统(ANFIS)和人工神经网络(ANN)等方法成功预测了灌溉管道中的湍流流体的摩擦系数,GEP模型的均方根误差 $E_{RMSE}$ 为0.000 32,决定系数 $R^2$ 为0.999。Çebi等<sup>[15]</sup>利用ANN预测了垂直光滑和微翅片管中纯水的摩擦系数,预测精度达到 $E_{RMSE}$ 为0.001 3, $R^2$ 为0.992 4。国内学者李井辉等<sup>[16]</sup>也基于BP神经网络模型对钻井工程中涉及的摩擦系数进行了有效的预测,最大绝对误差为0.005 8。王麟等<sup>[17]</sup>对人工加糙明渠的糙率进行预测,达到了极高的预测精度, $E_{RMSE}$ 为 $8.15 \times 10^{-5}$ 。

本文基于欧洲 CLASH 项目的越浪数据库,构建用于预测块体护面单坡式斜坡堤粗糙系数的神经网络模型,建立水力参数、结构参数和越浪值与越浪计算通常采用的静态粗糙系数之间的拟合关系,通过拟合精度评估采用这些粗糙系数值的合理性。这些结构形式涵盖了不同的流态和护面块体布置方式,能够整体反映粗糙系数的变化范围。

### 1 现有越浪量计算中粗糙系数的确定方法与局限性

对于简单单坡堤, Owen 经验公式为:

$$\frac{q}{gH_{m0}T_m} = a \exp\left(-b \frac{R_c}{H_{m0}} \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} \frac{1}{\gamma_f}\right) \quad (1)$$

式中:  $T_m$  为入射波的平均周期, s;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $q$  为平均越浪量,  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ;  $s_{om} = H_{m0}/L_{om}$  为波的陡度,  $H_{m0}$  为谱峰波高, m;  $R_c$  为堤顶出水面高度, m;  $\gamma_f$  为块体护面粗糙系数;  $a$  和  $b$  为依赖于防波堤的向海坡度的经验系数。

对于带有平台的单坡度防波堤, JTS 145—2015《港口与航道水文规范》<sup>[18]</sup> 提供了相应的经验公式。这些公式考虑了平台宽度、胸墙高度等因素对越浪量的影响。

无胸墙:

$$Q = AK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left(\frac{H_c}{H_{1/3}}\right)^{-1.7} \left[ \frac{1.5}{\sqrt{m}} + \text{th}\left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8\right) \right]^2 \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (2)$$

有胸墙:

$$Q = 0.07^{H_c/H_{1/3}} \exp\left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}\right) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[ \frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th}\left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8\right) \right]^2 \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (3)$$

式中:  $Q$  为单位时间单位堤宽的越浪量,  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ;  $A$ 、 $B$  为经验系数;  $K_A$  为护面块体影响系数, 与  $\gamma_f$  作用相似;  $H_{1/3}$  为有效波波高, m;  $T_p$  为谱峰周期, s;  $H_c$  为堤顶到静水面以上的高度, m;  $m$  为斜坡坡度系数;  $d$  为建筑物前水深, m;  $H'_c$  为胸墙墙顶到静水面以上的高度, m;  $b_1$  为胸墙前

肩宽, m。

国外复合斜坡堤越浪的常用公式包括 van der Meer 和 Eurotop 经验公式。

Van der Meer 经验公式:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4.75 \times \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_{m-1,0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v}\right) \quad (4)$$

Eurotop 经验公式:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left[-\left(2.7 \frac{R_c}{H_{m0} \xi_{m-1,0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v}\right)^{1.3}\right] \quad (5)$$

式中:  $q$  为单位时间单位堤宽的越浪量,  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ;  $\xi_{m-1,0}$  为波浪破碎参数,  $\xi_{m-1,0} = \tan\alpha / \sqrt{2\pi H_{m0} / (gT_{m-1}^2)}$ , 对于符合瑞利分布的深水波,  $H_{m0} = H_{1/3}$ , 浅水情况下二者存在差异;  $T_{m-1,0}$  为谱周期, s;  $\alpha$  为斜坡坡角;  $\gamma_b$ 、 $\gamma_f$ 、 $\gamma_\beta$ 、 $\gamma_v$  分别为防波堤肩台、护面块体、波向、胸墙的影响系数。

对比式(1)、(4)、(5)中的  $\gamma_f$  与式(2)、(3)中的  $K_A$  可见, 尽管国内外经验公式的表示方法存在差异, 但两者均表征防波堤护面块体的粗糙影响系数, 能够在一定程度上反映块体护面对越浪量的影响。两者取值均存在同样的局限性。

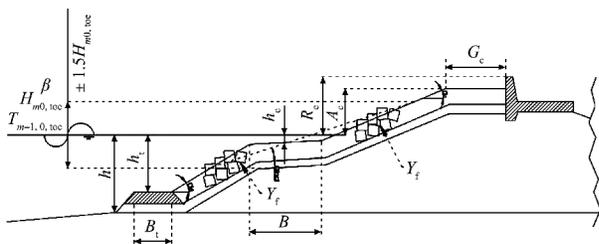
首先,  $\gamma_f(K_A)$  取值通常基于特定类型的块体护面, 而未充分考虑防波堤平台宽度、胸墙的几何特征以及块体排列方式等结构参数的综合影响。例如, 平台宽度的变化会显著改变波浪的流态, 胸墙的几何特征(如高度、形状)会影响波浪的反射和爬升<sup>[19]</sup>, 而块体的排列方式(如随机堆放或规则排列)则直接影响波浪能量的耗散。然而, 现有公式往往对不同类型块体采用统一的  $\gamma_f(K_A)$  取值, 忽略了这些结构参数对粗糙系数的影响。其次, 现有公式在确定  $\gamma_f(K_A)$  时, 通常未考虑波浪特征(如波高、波陡)的影响。波高和波陡是描述波浪能量的重要参数, 直接影响波浪与块体护面之间的相互作用。例如, 高波陡的波浪在遇到块体护面时会产生更强的能量耗散, 而低波陡的波浪则可

能更容易越过防波堤<sup>[20]</sup>。现有公式中的  $\gamma_f(K_A)$  取值往往基于固定的波浪条件, 未能全面反映波浪特征对粗糙系数的动态影响。

## 2 数据处理

### 2.1 数据来源

基于欧盟 CLASH 项目(2002 年 1 月—2004 年 12 月)构建的 EurOtop 越浪数据库是海岸工程领域具有里程碑意义的数据基础设施, CLASH 项目的斜坡堤截面见图 1。该数据库通过系统化整合全球实验室与现场观测数据, 与全球越浪数据兼容, 为波浪越浪机理研究及防护工程设计提供了多维度的参数化支撑体系。数据库首创性地建立了双重质量评估指标: 可靠因子(reliability factor, RF)和复杂因子(complexity factor, CF), 均采用 1~4 级。其中, RF 通过实验环境控制精度、传感器校准记录、数据重复性验证等 12 项技术指标进行量化, CF 的确定方式主要基于实验条件的复杂性和数据获取的难度。数据库通过 31 个核心参数(水力参数组 11 项、结构参数组 17 项、元数据组 3 项)实现测试案例的标准化描述, 其分类体系体现了工程系统分析的严密逻辑。CLASH 数据库的建设标志着海岸工程从经验主导迈向数据驱动的新阶段, 其参数化思维更启发了 TRIZ 理论在流体力学领域的创新应用。



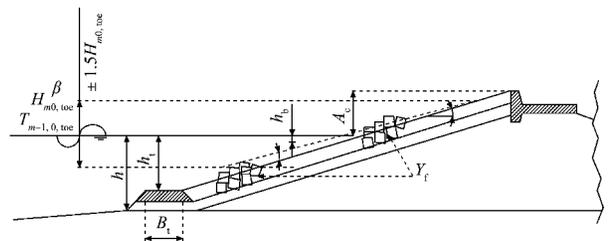
## 2.2 数据筛选

### 2.2.1 数据清洗

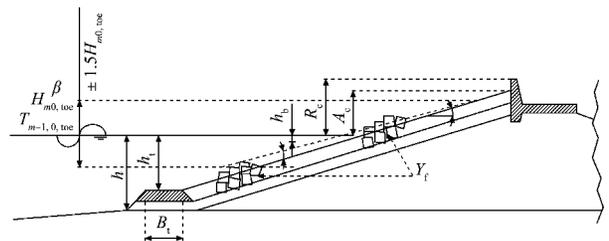
数据库中包括 10 533 组数据, 为提高数据质量和模型可靠性, 对原始数据集进行严格筛选。1) 剔除了 CF 和 RF 为 4 的数据组, 因其可信度较低且结构复杂度较高; 2) 删除了无法计算或存在空值的数据组; 3) 排除了备注信息中明确标注不适用于神经网络建模的数据组; 4) 去除了  $q < 1 \times 10^{-7}$  的极端小值数据组, 以避免低越浪工况的噪声干扰; 5) 删除了  $\gamma_f = 1$  的数据组, 确保所有斜坡堤均为粗糙斜坡; 6) 仅保留正向入射波( $\beta = 0^\circ$ )的数据组, 以消除波浪斜向入射的影响。通过上述步骤, 最终获得高置信度、高一致性的数据集, 为神经网络建模奠定了可靠基础。

### 2.2.2 数据筛选

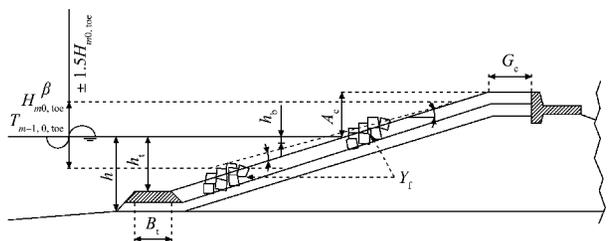
选定单坡斜坡堤 2 367 组数据, 筛选条件:  $B=0$ 、 $\cot\alpha_u = \cot\alpha_d$ 、 $R_c > 0$ 、 $A_c > 0$ 、 $G_c > 0$ 。其中包括以下 4 种结构, 见图 2。



a) 结构1(简单单坡堤)



b) 结构2(带胸墙单坡堤)



c) 结构3(带堤顶单坡堤)

注:  $T_{m-1,0,toc}$  为谱周期, s;  $h$  为堤前水深, m;  $H_{m0,toc}$  为堤脚前有效波高, m;  $h_t$  为堤脚浸没水深, m;  $h_b$  为肩台淹没深度, m;  $\alpha_u$  为上坡角度;  $\alpha_d$  为下坡角度;  $\alpha_{incl}$  为波浪爬高范围内的平均角度;  $A_c$  为堤顶超高, m;  $R_c$  为胸墙高度, m;  $B_t$  为堤脚平台宽度, m;  $G_c$  为堤顶平台宽度, m;  $q$  为越浪量,  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ 。

图 1 CLASH 项目斜坡堤结构截面

Fig. 1 Cross-section of the breakwater structure in CLASH project

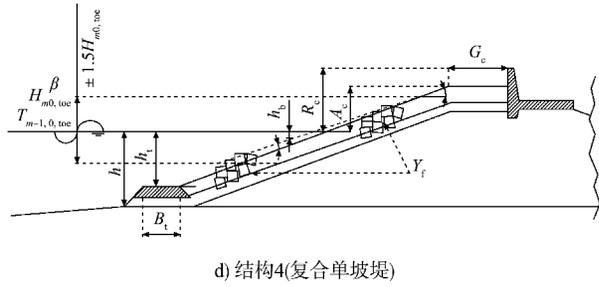


图 2 4 种不同防波堤结构形式的截面

Fig. 2 Cross-sections of four different breakwater configurations

### 2.3 参数选取

#### 2.3.1 参数类别

通过严格的数据筛选, 最终确定防波堤结构参数如下。

1) 水力参数。堤前水深  $h$ : 反映波浪传播水深条件; 堤脚前有效波高  $H_{m0,toe}$ : 量化入射波浪能量; 堤脚浸没水深  $h_t$ : 表征波浪冲击位置。

2) 结构参数。上坡坡度  $\cot\alpha_u$ : 反映斜坡陡峭程度; 波浪爬高范围内平均坡度  $\cot\alpha_{incl}$ : 反映波浪爬高区域整体等效坡度; 堤顶超高  $A_c$ : 堤顶与静水位高度差; 胸墙高度  $R_c$ : 带胸墙结构特有参数; 堤脚平台宽度  $B_f$ : 堤脚消能平台的相对宽度; 堤顶平台宽度  $G_c$ : 带平台结构特有参数。

3) 越浪量参数。越浪量  $q$ : 反映波浪越浪强度。

#### 2.3.2 输入参数与粗糙系数之间的关系

物理机制相关性: 波浪能量参数 ( $h$ 、 $H_{m0,toe}$ 、 $h_t$ 、 $q$ ) 直接影响波浪与块体护面的冲击强度, 波陡越大, 能量耗散需求越高,  $\gamma_f$  越小; 结构几何参数 ( $\cot\alpha_u$ 、 $\cot\alpha_{incl}$ 、 $A_c$ 、 $R_c$ 、 $B_f$ 、 $G_c$ ) 通过改变波浪爬高路径与反射特性影响消能效率, 如胸墙

高度  $R_c$  增加会反射更多波能, 间接提高  $\gamma_f$  取值。

#### 2.3.3 输入参数与粗糙系数的作用机制

所有结构参数 ( $\cot\alpha_u$ 、 $\cot\alpha_{incl}$ 、 $A_c$ 、 $R_c$ 、 $B_f$ 、 $G_c$ ) 和波浪能量参数 ( $h$ 、 $H_{m0,toe}$ 、 $h_t$ 、 $q$ ) 均可通过不同机制改变波浪在堤体表面的爬升和破碎过程, 调节块体层内的水流能量的耗散强度, 并反映在量测的越浪量。因而粗糙系数和越浪量及其他水力和结构参数存在复杂的非线性关系。

$\gamma_f$  可以被看作为一个综合反映块体对越浪的影响参数, 其取值的可靠性可用机器学习方法评估, 因此, 神经网络模型方法基于数据训练可建立物理量之间的相关关系。

### 2.4 数据处理

数据预处理包括无量纲化处理和标准化处理。数据标准化采用的一般公式为:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (6)$$

其中:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (8)$$

式中:  $x$  为原始数据;  $\mu$  为数据的均值;  $\sigma$  为数据的标准差;  $z$  为标准化后的数据。在模型预测完成后, 将标准化后的结果转换回原始尺度:

$$x = z\sigma + \mu \quad (9)$$

本文采用与 van Gent 等同样的无量纲参数, 对应于 4 种斜坡结构的参数值, 见表 1。4 种斜坡堤结构所用数据量和块体护面类型见表 2<sup>[21-28]</sup>。

表 1 4 种结构的神经网络模型参数

Tab. 1 Parameters of the neural network model for the four structures

斜坡堤 结构	$h/L_{m-1,0,toe}$		$H_{m0,toe}/L_{m-1,0,toe}$		$h_t/H_{m0,toe}$		$\cot\alpha_u$		$\cot\alpha_{incl}$		$A_c/H_{m0,toe}$	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
结构 1	0.06~0.36	0.12	0.01~0.06	0.04	1.04~7.06	3.04	1~5	2.99	1~5	2.99	1~3.56	1.73
结构 2	0.06~0.35	0.19	0.03~0.08	0.05	1.07~7.21	3.49	2~4	3.12	2~4	3.12	0.18~1.39	0.60
结构 3	0.05~0.83	0.19	0.008~0.08	0.05	0.67~17.57	4.08	1.33~5	2.09	1.33~5	2.09	0.47~3.5	1.32
结构 4	0.02~0.35	0.13	0.01~0.08	0.05	0.63~7.63	2.41	1.3~4	1.92	1.3~4	1.92	0.07~2.63	0.84

续表1

斜坡堤结构	$B_c/L_{m-1,0,toe}$		$R_c/H_{m0,toe}$		$G_c/L_{m-1,0,toe}$		$q/(gH_{m0,toe}^3)^{0.5}$		$\gamma_f$	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
结构 1	0~0.04	0.006	-	-	-	-	$1.03 \times 10^{-6} \sim 0.006$	$4.3 \times 10^{-4}$	0.4~0.9	0.64
结构 2	0~0.08	0.001	0.55~1.8	1.03	-	-	$8.03 \times 10^{-6} \sim 0.015$	$40.47 \times 10^{-4}$	0.35~0.97	0.65
结构 3	0~0.15	0.02	-	-	0.02~0.25	0.07	$0.52 \times 10^{-6} \sim 0.011$	$7.19 \times 10^{-4}$	0.380~0.600	0.42
结构 4	0~0.12	0.01	0.46~3.18	1.39	0.006~0.31	0.08	$0.76 \times 10^{-6} \sim 0.030$	$12.28 \times 10^{-4}$	0.33~0.98	0.50

表 2 4 种防波堤结构的数据量与块体护面类型  
Tab. 2 Dataset size and armor unit types of the four breakwater configurations

斜坡堤结构	数据量/组	块体护面类型
结构 1	83	抛石
结构 2	73	抛石、块石
结构 3	1 162	块石、扭工字块体、扭王字块体、高密度岩石、Antifer cubes、Core-Locs
结构 4	1 049	抛石、块石、扭工字块体、大块石料

### 3 模型搭建和计算结果

#### 3.1 模型搭建

深度学习人工神经网络模拟大脑神经元，通过多层结构处理复杂数据。每层由多个神经元组成，接收前一层输出，加权求和后通过非线性激活函数传递到下一层，得到预测结果。训练时，网络利用大量数据样本和 BP 反向传播算法 (back propagation) 调整权重，最小化损失函数。

利用 PyTorch 框架构建一个 BP 神经网络模型，通过逐步试验法反复调试隐藏层层数与节点数，最终确定隐藏层为 3 层，节点数分别为 32、64 和 64 个。选择 ReLU 作为激活函数，有效提升了模型的学习能力和泛化能力。采用 Adam 优化器，并结合  $L_2$  正则化 (权重衰减) 和学习率调度器 (reduce LR on plateau)，显著提高了模型训练的效率及收敛速度。通过合理的超参数调优 (如学习率、批量大小、Dropout 比例等)，进一步提升了模型的精度与鲁棒性。为了防止过拟合，在每层后引入 Dropout 层，并通过标准化处理和数据分割确保模型的稳定性。最终，经过多次训练和验证，成功搭建一个完善的深度神经网络预测模型，能够准确预测目标值，并通过可视化工具损失曲线图

和预测散点图直观展示模型的性能。简单神经网络模型结构见图 3。

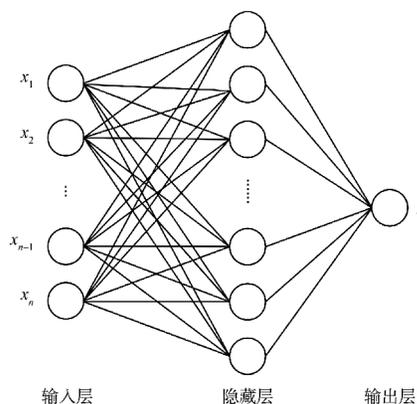


图 3 简单神经网络模型结构

Fig. 3 Simple neural network model architecture

#### 3.2 模型预测结果分析

为了评估输入参数整体对粗糙系数的预测能力，首先利用 4 种结构的全部数据构建神经网络模型。模型训练集和测试集计算结果见图 4，模型在训练和测试阶段均表现出较高的计算精度，训练集的决定系数  $R^2$  为 0.952，均方根误差  $E_{RMSE}$  为 0.031；测试集的  $R^2$  为 0.935， $E_{RMSE}$  为 0.035。但是远不及相关领域对粗糙系数的预测精度，如 Samadianfard 等预测灌溉管道中的湍流流体的摩擦系数  $E_{RMSE}$  为 0.000 32， $R^2$  为 0.999；Çebi 等对垂直光滑和微翅片管中纯水的摩擦系数预测， $E_{RMSE}$  为 0.001 3， $R^2$  为 0.992 4。其主要原因是输入数据缺乏描述块体斜坡特性的参量，如块体大小、形状及孔隙率等。从各结构数据分布可以看出，相较于其他结构，模型对结构 3 的数据拟合最差。

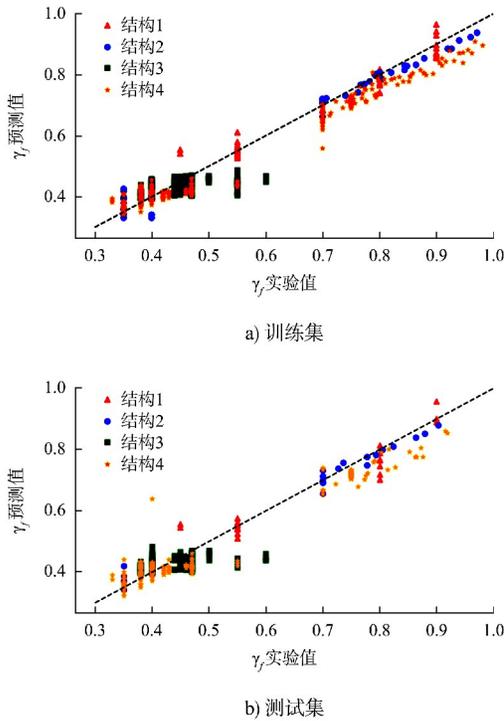


图 4 整体数据模型预测散点图  
Fig. 4 Scatter plot of the overall model predictions

为了探究不同结构数据对拟合精度的影响, 利用结构 1 的 8 个输入参数建立 ANN1 模型, 结构 2 的 9 个输入参数建立 ANN2 模型, 结构 3 的 9 个输入参数建立 ANN3 模型, 结构 4 的 10 个输入参数建立 ANN4 模型。4 种不同结构形式下的预测结果见图 5。

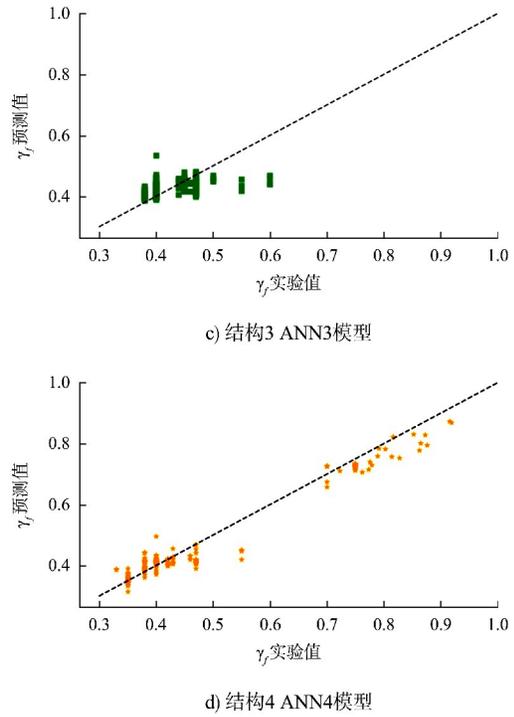
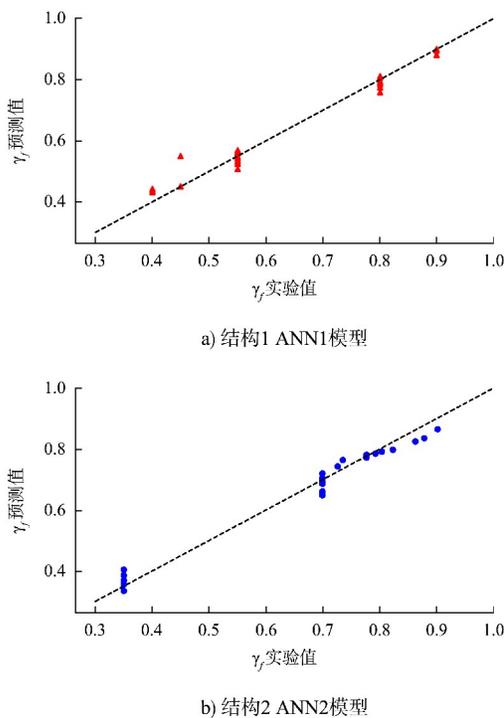


图 5 4 种结构模型预测散点图  
Fig. 5 Scatter plots of model predictions for the four configurations

可以看出, 虽然 4 种模型采用了相同的神经网络架构, 但由于分别针对不同的防波堤结构数据建模, 得到的拟合精度很不相同。ANN1 的  $R^2$  为 0.970,  $E_{RMSE}$  为 0.030, 表明该模型在预测简单单坡堤的粗糙系数时具有较高的准确性和可靠性。ANN2 的  $R^2$  值为 0.979,  $E_{RMSE}$  为 0.027, 均略高于 ANN1。ANN4 的  $R^2$  值达到 0.966,  $E_{RMSE}$  为 0.031, 表明结构的复杂程度和输入参量维度并不影响预测精度。然而 ANN3 尽管  $E_{RMSE}$  较低(0.033), 但其  $R^2$  值仅为 0.305, 拟合度显著不足, 其原因主要是该组数据中粗糙系数试验值过窄。根据  $R^2$  的计算公式, 由于粗糙系数的极端集中分布, 使得其分母(总平方和)是 4 个模型中最小的, 而分子(残差平方和)却是最大的, 导致数据本身的变异程度(分母是目标值的总变异, 即各数据点与均值的偏离程度)极其有限。与此同时, 虽然 ANN3 的  $E_{RMSE}$  与其他模型处于相近水平, 但由于分母过小, 使得残差平方和在比值中占据了主导地位, 最终导致  $R^2$  值被严重压低。

Legates 等<sup>[29]</sup>以水文模型为例, 展示了低变异



b) 结构2 ANN2模型

数据下  $R^2$  的局限性，解释了当目标变量的变化范围过小时， $R^2$  指标会失去其常规的解释意义。本文更应关注  $E_{RMSE}$  等误差指标，它们显示 ANN3 的实际预测误差与其他模型相当，表明模型本身的预测能力并没有  $R^2$  值所展示的那样显著劣化。 $R^2$  在数据变异较小时会严重失真，而  $E_{RMSE}$  更能反映模型的实际预测能力。

### 3.3 模型可解释性分析

为了探究深度神经网络的可解释性，基于模

型的训练和预测结果，采用 SHAP 方法，依据随机森林输入特征重要性排名，确定 4 种神经网络模型对  $\gamma_f$  影响较大的主要参数。该方法可以全面考虑特征之间的交互作用，因此倾向于选择多种情况下对模型输出有显著影响的特征，有助于更直观地理解模型的决策过程，识别关键特征，并增强模型的可解释性和透明度。4 个神经网络模型基于 SHAP 值对  $\gamma_f$  影响较大的前 3 个参数见表 3。

表 3 主要参数敏感性分析  
Tab. 3 Sensitivity analysis of key parameters

神经网络模型	全部参数 $E_{RMSE}$	无 $B_t/L_{m-1,0,10e}$ $E_{RMSE}$ 变化量/%	无 $A_c/H_{m0,10e}$ $E_{RMSE}$ 变化/%	无 $q/(gH_{m0,10e}^2)^{0.5}$ $E_{RMSE}$ 变化/%	无 $h/L_{m-1,0,10e}$ $E_{RMSE}$ 变化/%	无 $R_c/H_{m0,10e}$ $E_{RMSE}$ 变化/%	无 $G_c/L_{m-1,0,10e}$ $E_{RMSE}$ 变化/%
ANN1	0.030	177	163	83	-	-	-
ANN2	0.027	63	-	-	33	48	-
ANN3	0.033	-	3	6	3	-	-
ANN4	0.031	-	19	-	-	23	10

从表 3 可以看出，在不同斜坡堤结构的神经网络模型中，各输入参数对  $\gamma_f$  的影响程度有显著差异。由于模型 ANN1 对应简单单坡堤，堤脚宽度  $B_t$ 、堤顶到静水面距离  $A_c$ 、平均越浪量  $q$  影响最大。堤顶到水平面的距离的变化直接影响波浪的越浪高度， $A_c$  越大， $q$  会相应减少；然而，平均越浪量的增加通常会导致波浪能量在块体堤体上的耗散增加，也会对  $\gamma_f$  产生影响。模型 ANN2 影响最大的输入参数也是  $B_t/L_{m-1,0,10e}$ ，因为 ANN2 对应带胸墙单坡堤，因此对  $\gamma_f$  的主要影响参数变成了胸墙顶到静水面的距离  $R_c$ ，其通过改变波浪破碎位置和能量耗散机制，改变了水流流态，最终对  $\gamma_f$  的预测模型产生系统性影响：一方面，胸墙会反射部分入射波能，形成复杂的干涉波系；另一方面，当波浪越过胸墙时会产生明显的射流现象，这种流态改变会显著影响波浪的爬高特性。

此外，堤前水深  $h$  对  $\gamma_f$  的影响主要体现在波浪传播和能量耗散的过程中，例如在较深的水域中，波浪的变形和破碎相对较少，波浪对堤体的冲击更加直接，能量耗散主要集中在堤体表面，

从而影响了  $\gamma_f$ 。模型 ANN3 对应带堤顶单坡堤，由于该结构的输出参数  $\gamma_f$  数据范围太窄，难以和输入参数拟合。表 3 显示 ANN3 的主要影响参数有堤顶到静水面距离  $A_c$ 、平均越浪量  $q$  和堤前水深  $h$ ，但这 3 个参数的敏感度均很低。模型 ANN4 对应复合单坡堤，当  $R_c$  和  $A_c$  的距离较大时，波浪越浪的可能性降低，波浪能量更多地被反射或耗散在堤体前坡上，而当距离较小时，波浪越浪量增加，波浪能量直接冲击胸墙或越过堤体，进而影响  $\gamma_f$ ；堤顶宽度  $G_c$  则是通过改变斜坡占整个堤身的比例，即改变了块体区域占整个复合堤表面的比重，进而影响  $\gamma_f$ 。

### 4 结语

1) 研究发现神经网络模型对粗糙系数的拟合精度与防波堤结构形式(如胸墙高度、堤顶平台宽度)显著相关，且不同结构类型预测精度差异明显。简单单坡堤  $R^2=0.970$ ，带堤顶平台单坡堤因数据分布窄  $R^2=0.305$ 。

2) 通过 SHAP 值敏感性分析，明确了不同结

构中影响粗糙系数的关键参数。对于简单单坡堤(ANN1),堤脚宽度、堤顶高度和越浪量影响最大,其中堤顶高度增加会减少越浪量,而越浪量增大又增强能量耗散。带胸墙单坡堤(ANN2)主要受胸墙高度控制,该参数通过改变波浪破碎位置和流态,既引起波能反射又产生射流现象。带堤顶单坡堤(ANN3)因 $\gamma_f$ 数据范围有限,各参数敏感性均较低,主要影响参数有堤顶到静水面距离、平均越浪量和堤前水深。复合单坡堤(ANN4)中,胸墙与堤顶的相对位置决定波浪越浪或反射的程度,堤顶宽度则通过改变块体占比影响 $\gamma_f$ 。

3)该方法不仅适用于斜坡堤结构,还可推广至其他类型的水工建筑物(如桩基防波堤、复合式海堤)的越浪预测,为工程设计提供更精准的动态糙率评估工具,具有重要的理论价值和工程应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 王慧,全梦媛,徐卫青,等.中国沿海和近海海平面上升预测[J].海洋学报,2023,45(8):1-10.  
WANG H, QUAN M Y, XU W Q, et al. Sea level rise projection in China's coastal and offshore areas[J]. Acta oceanologica sinica, 2023, 45(8): 1-10.
- [2] 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.
- [3] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping [R]. HR Wallingford: Hydraulics Research, United Kingdom, 1980.
- [4] VAN DER MEER J W. Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes [R]. Delft: Technical Advisory Committee on Flood Defence, 2002.
- [5] VAN DER MEER J W, ALLSOP W H, BRUCE T, et al. EurOtop-Manual on wave overtopping of sea defences and related structures[M]. [S. l.]: [s. n.], 2016.
- [6] MOLINES J, MEDINA J R. Calibration of overtopping roughness factors for concrete armor units in non-breaking conditions using the CLASH database [J]. Coastal engineering, 2015, 96: 62-70.
- [7] VAN GENT M R A, WOLTERS G, CAPEL A. Wave overtopping discharges at rubble mound breakwaters including effects of a crest wall and a berm[J]. Coastal engineering, 2022, 176: 104151.
- [8] 许建武,杨小龙,沈雨生,等.某四角锥护面斜坡堤损坏原因分析[J].水运工程,2021(7):32-38.  
XU J W, YANG X L, SHEN Y S, et al. Damage analysis of a breakwater with tetrapod armor[J]. Port & waterway engineering, 2021(7): 32-38.
- [9] VAN GENT M R A, VAN DEN BOOGAARD H F P, POZUETA B, et al. Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures[J]. Coastal engineering, 2007, 54(8): 586-593.
- [10] 黄建,董丽红.海堤越浪量的人工神经网络模型算法[J].水道港口,2020,41(4):489-494.  
HUANG J, DONG L H. Application of artificial neural network model in the calculation of overtopping of seawall [J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(4): 489-494.
- [11] 胡原野,王收军,陈松贵,等.基于随机森林的复坡堤越浪量预测研究[J].海洋学报,2021,43(10):106-114.  
HU Y Y, WANG S J, CHEN S G, et al. Overtopping prediction for composite slope breakwater based on random forest method [J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(10): 106-114.
- [12] ZANUTTIGH B, FORMENTIN S M, VAN DER MEER J W. Prediction of extreme and tolerable wave overtopping discharges through an advanced neural network[J]. Ocean engineering, 2016, 127: 7-22.
- [13] FORMENTIN S M, ZANUTTIGH B, VAN DER MEER J W. A neural network tool for predicting wave

- reflection, overtopping and transmission [J]. Coastal engineering journal, 2017, 59(1): 1750006.
- [14] SAMADIANFARD S, SATTARI M T, KISI O, et al. Determining flow friction factor in irrigation pipes using data mining and artificial intelligence approaches [J]. Applied artificial intelligence, 2014, 28(8): 793-813.
- [15] ÇEBI A, AKDOĞAN E, CELEN A, et al. Prediction of friction factor of pure water flowing inside vertical smooth and microfin tubes by using artificial neural networks [J]. Heat and mass transfer, 2017, 53 (2): 673-685.
- [16] 李井辉, 申静波, 闫铁, 等. 基于 BP 神经网络的摩擦系数预测方法研究 [J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(23): 179-185.
- LI J H, SHEN J B, YAN T, et al. The research of friction coefficient prediction based on BP neural network [J]. Mathematics in practice and theory, 2015, 45(23): 179-185.
- [17] 王麟, 赵涛. 基于 BP 神经网络的人工加糙明渠糙率预测模型 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (9): 125-127, 124.
- WANG L, ZHAO T. Prediction model of roughness coefficient of artificially roughened open channel based on BP neural network [J]. Water resources and power, 2021, 39(9): 125-127, 124.
- [18] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [19] 王键, 孙大鹏, 吴浩. 带胸墙斜坡堤越浪量的数值试验研究 [J]. 海洋工程, 2018, 36(4): 138-146.
- WANG J, SUN D P, WU H. Numerical study on overtopping of sloping breakwater with crown-wall [J]. The ocean engineering, 2018, 36(4): 138-146.
- [20] 孙大鹏, 修富义, 王键, 等. 扭王字块体护面斜坡堤越浪量试验研究 [J]. 海洋工程, 2019, 37(5): 1-9.
- SUN D P, XIU F Y, WANG J, et al. Experimental investigation on mean overtopping rate of sloping breakwater with accropode armor blocks [J]. The ocean engineering, 2019, 37(5): 1-9.
- [21] VAN DER MEER J W, DE WAAL J P. Waterbeweging op taluds: Invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang-en kortkammige golfaanval [R]. [S. l. ]: [s. n. ], 1993.
- [22] AHREND J P, HEIMBAUGH M S, DAVIDSON D D. Irregular wave overtopping of seawall/revetment configurations, roughans point, Massachusetts: experimental model investigation [R]. Vicksburg: Coastal Engineering Research Center, 1986.
- [23] AMINTI P, FRANCO L. Wave overtopping on rubble mound breakwaters [C]//Coastal Engineering Proceedings. New York: American Society of Civil Engineers, 1989: 770-781.
- [24] FRANCO L, CAVANI A. Overtopping response of core-locs, tetrapods and antifer cubes [J]. Proceeding conference coastal structures, 1999, 1: 383-388.
- [25] PEARSON J, BRUCE T, FRANCO L, et al. Report on additional tests, Part B [R]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2004.
- [26] STEWART T P, NEWBERRY S D, SIMM J D, et al. The hydraulic performance of tightly packed rock armour layers [C]//Coastal Engineering 2002-Solving Coastal Conundrums - 28th International Conference. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003: 1449-1461.
- [27] SAKAKIYAMA T, KAJIMA R. Wave overtopping and stability of armor units under multidirectional waves [C]//Coastal Engineering 1996. New York: American Society of Civil Engineers, 1997: 1862-1875.
- [28] HELGASON E. Design basis for use of high density stones in rubble mound breakwaters [M]. Aalborg: Aalborg Universitet, 1999.
- [29] LEGATES D R, MCCABE G J J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation [J]. Water resources research, 1999, 35(1): 233-241.