

文章编号:1673-9469(2026)01-0054-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.008

## 波浪作用下含飞檐结构的新型砌块护坡面变形特征分析

郭子轩<sup>1,2</sup>, 单建军<sup>3</sup>, 孙悦添<sup>4</sup>, 杨斌<sup>3</sup>, 李思远<sup>1</sup>, 孙树林<sup>1\*</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222;  
3. 淮河工程集团有限公司, 江苏 徐州 221400; 4. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012)

**摘要:** 为研究河道边坡坡面的稳定性影响因素, 在传统连锁砌块的基础上, 提出增加双植生孔与飞檐结构, 以增强砌块护坡的生态功能。以沐河莒县段河道护坡工程为例, 分析不同防护工况下连锁式混凝土砌块护坡面的稳定性。通过 PFC 软件模拟砂土颗粒在植生孔中的堆积形态。结果表明: 将新型砌块的开孔率设计为 16%, 植生孔单孔尺寸为 140 mm×96 mm 时, 飞檐结构的设计宽度值域为 3.6~4.7 cm, 可有效减小植生孔中的水土流失; 在砌块材料强度充足的情况下, 含飞檐结构砌块护岸面的削波减浪能力大幅提升。采用 ABAQUS 软件进行三维实体建模分析, 不同防护工况的砌块受波浪反压力情况下的应力云图及位移云图对比显示: 选择碎石为护坡垫层且砌块为横向铺设时, 可以增强护坡面层的整体稳定性, 结合飞檐设计可以达到兼具稳定性与生态性的护坡效果。

**关键词:** 护坡工程; 连锁式混凝土砌块; 数值模拟; 沐河流域

**中图分类号:** TV861

**文献标识码:** A

## Analysis of Deformation Characteristics of New Type Masonry Slope Protection Surfaces with Overhanging Corners Under Wave Action

GUO Zixuan<sup>1,2</sup>, SHAN Jianjun<sup>3</sup>, SUN Yuetian<sup>4</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>, LI Siyuan<sup>1</sup>, SUN Shulin<sup>1\*</sup>

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;  
2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China;  
3. Huaihe Engineering Group Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221400, China; 4. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210012, China)

**Abstract:** To study the influencing factors of the stability of the slope surface of the river channel, on the basis of the traditional interlocking blocks, the double plan-ting holes and the eaves structure are proposed to be added to enhance the ecological function of the block slope protection. Taking the riverbank protection project of the Suhe River in Juxian County as an example, the stability of the slope surface composed of the interlocking concrete blocks under different protection conditions is analyzed. The accumulation morphology of sand particles in the planting holes is simulated by PFC software. The results show that when the opening rate of the new type of blocks is set at 16% and the single hole size of the planting holes is 140 mm×96 mm, the design width for the eave structure is 3.6 to 4.7 cm, which can effectively reduce soil and water erosion in the planting holes. Under the condition that the material strength of the blocks is sufficient, the optimized design significantly enhances the wave-breaking and wave-reducing capacity of the slope surface composed of the blocks with the eave structure. The three-dimensional solid modeling analysis is carried out using ABAQUS software. The stress cloud diagrams and displacement cloud diagrams of the blocks under the wave counter-pressure in different protec-

收稿日期: 2024-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41902244); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJXC23\_0181); 中央高校科研业务费专项资金资助项目(2109B42214)

第一作者: 郭子轩(1998—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事岩土体加固、护坡工程方面的研究。

\* 通信作者: 孙树林(1963—), 男, 江苏盐城人, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程、环境岩土方面的研究。

tion conditions are compared and analyzed, showing that by choosing crushed stone as the slope pad layer and laying the block flanges horizontally, the overall stability of the slope surface layer can be enhanced. Combined with the eave design, a stable and ecological slope protection effect can be achieved.

**Key words:** slope protection; slain concrete block; numerical simulation; Shu River Basin

河道护坡工程的主要目的是保护河流、海岸或其他水域周围的土壤和岩石不受水流冲刷、风浪侵蚀的影响<sup>[1]</sup>。该类工程对于维护自然环境的稳定、保障人民生命财产安全以及确保基础设施的正常运行发挥着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。传统护坡工程主要考虑防洪、排涝、引水和航运等基础功能,但没有考虑到水体与土壤之间的物质交换。例如,干砌石护坡、喷混凝土护坡、现浇混凝土护坡等传统护坡工程,其简硬的硬性防护破坏了河道的资源功能和生态功能,不利于生态环境的保护<sup>[3-4]</sup>。新型生态护坡通过种植植物实现生态环境改善和坡面土体稳固,但与传统护坡形式相比,生态护坡往往难以兼顾经济性和防护强度<sup>[5-6]</sup>。连锁型砌块护坡不仅能通过砌块的嵌锁作用确保坡面稳定,还具备一定的水土保持功能。陈传亮<sup>[7]</sup>认为砌块护坡具有提高防护强度、铺设方式简单以及环境友好等优点。张玉清等<sup>[8]</sup>提出,使用空心砌块可为植物生长提供空间。尹刚等<sup>[9]</sup>在凹形连锁砌块护坡表面进行绿化种植,在保证坡面防冲刷的基础上,通过植物根系的锚固作用进一步提升了防护效果。然而,当砌块中间存在孔洞结构时,坡面整体与单个砌块的受力情况均会发生显著变化。波浪会对砌块表面及孔洞内部产生作用力,导致坡体水土流失,进而威胁护坡结构的稳定性,并对生态环境的恢复与保护造成不利影响<sup>[10-13]</sup>。因此,在确保护坡结构安全稳定的前提下,如何使工程建设有利于水土保持与生态平衡,是目前亟待解决的热点问题。

本文以传统砌块为基础,提出一种含飞檐结构的新型空心砌块,该砌块既具备护坡、消浪的功能,又能在提供植生孔的同时减少因孔洞导致的水土流失。本研究使用 PFC 离散元软件模拟砂土颗粒在植生孔中的堆积形态,确定飞檐结构与植生孔的设计尺寸。通过分析砌块坡面稳定性影响因素,利用 ABAQUS 软件建立波浪重点冲击部分的三维数值模型,对不同砌块铺设方案下坡面的应力和应变状况进行数值模拟。对比砌块优化前后的最大应力与最大位移,验证了新型砌块的有效性与优越性,研究成果可为其在实际工程中的运用提供理论依据和技术支撑。

## 1 研究区概况

为定量分析影响砌块护坡稳定性的因素,本文以沭河流域莒县段的河道护坡工程为研究对象开展研究。沭河属雨源性山洪河道,夏秋两季峰高流急。部分岸坡具有上砾质粗砂、下砂质泥岩的双层地质结构,因其抗冲刷、抗掏蚀能力差,需加强防护。研究区岸坡土体物理力学参数见表 1。

岸坡稳定性受到多种内外因素的共同影响:内因主要是研究区的工程地质与水文地质条件;外因则涉及气象因素和河流动力作用等,其中波浪作用是重要动态影响因素之一。根据生成机制,波浪可划分为风成波和船行波两类。波浪导致护坡失稳的机制主要为波浪上托力导致的护岸面结构破坏(图 1)、垫层和反滤层破坏导致的护岸

表 1 土体物理力学主要参数表

Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of soil

层号	土质类型	饱和密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	饱和快剪		固结快剪		压缩模量/ MPa	渗透系数/ ( $cm \cdot s^{-1}$ )
				黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )		
②-1	壤土	1.92	1.55	30.09	14	35.24	20.5	8	$7.7 \times 10^{-5}$
③	中砂	1.72	1.62	0.00	27	0.00	26.6	12	$6.9 \times 10^{-3}$
⑤	砾质粗砂	2.01	1.93	0.00	32	—	—	16	$5.0 \times 10^{-1}$
⑥	细砾	2.08	1.80	0.00	35	—	—	20	$3.8 \times 10^{-1}$

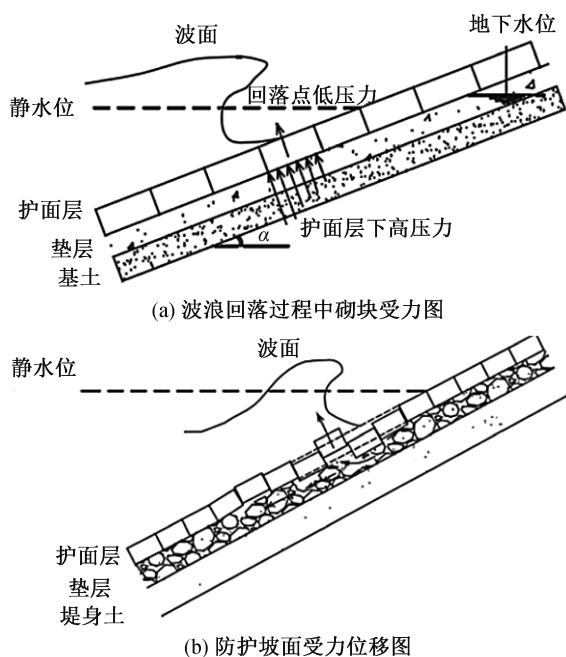


图1 波浪上托力导致的砌块失稳

Fig. 1 Block instability due to wave uplift forces

面结构破坏、下部土体稳定性缺失导致的护岸面结构破坏以及护面层滑动造成的砌块面层失稳<sup>[14]</sup>。

参照《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)<sup>[15]</sup>,本文采用莆田试验站公式计算风成波浪要素。经计算,风浪引起的动水面波浪爬升高度 $\Delta h$ 为1.097 m,静水位上部反压力 $P_1$ 为3.039 kPa,静水位下部反压力 $P_2$ 为1.215 kPa,取二者较大值为风成波浪反压力,即 $P_{c,风}$ 为3.039 kPa。船行波浪反压力的计算采用荷兰Delft水工试验所公式,船行速度取值为《内河航道工程设计标准》(DG/TJ 08—2116—2020)规定的最高设计航速15 km/h。计算得到船行波引起的动水面波浪爬升高度 $\Delta h$ 为0.764 m,静水位上部反压力 $P_1$ 为2.116 kPa,静水位下部反压力 $P_2$ 为0.846 kPa。取二者较大值为船行波浪反压力,即 $P_{c,船}$ 为2.116 kPa。在对模型施加波浪荷载时,波浪反压力为风成波浪反压力与船行波浪反压力之和,计算可得波浪反压力为5.155 kPa。

## 2 飞檐空心砌块设计方案

传统护坡常采用水泥砌块平铺的方式,见图2(a),砌块横置时的长度为 $L$ ,宽度为 $b$ ,砌块的厚度为 $T$ 。传统砌块虽然能起到稳固基部结构、防止水土流失的作用,但阻碍了水与土体之间的交流,影响了河道的自净能力。生态护坡不仅需要具有

传统护坡的功能,还应融入生态系统恢复和保护等内容<sup>[16-17]</sup>。常见生态护坡虽然能够提供植物生长空间,但在水流持续地冲刷下,易导致水土大量流失,植物根系难以稳固,难以实现理想的生态功能。因此,本文在传统砌块的基础上进行了以下改进:

(1)在传统砌块主体的中部开设对称布置的植生孔,在植生孔的两侧水平方向设计一个小沟槽,用于植生孔之间的水土交换,开孔设计示意图见图2(b)。该设计既能解决传统硬质护坡阻碍水土交流的问题,还可通过在植生孔中种植植物,增强土质坡面的整体稳定性和生态美观性。

(2)如图2(c)所示,在植生孔的下端增设飞檐结构,可有效拦阻被波浪反压力作用带出的土质,解决因砌块开孔面积较大可能导致的水土流失问题。该结构与植生孔设计相配合,增强了护坡工程的水土保持效果,在保障坡面防护牢固稳定的同时,显著提升了生态效益。

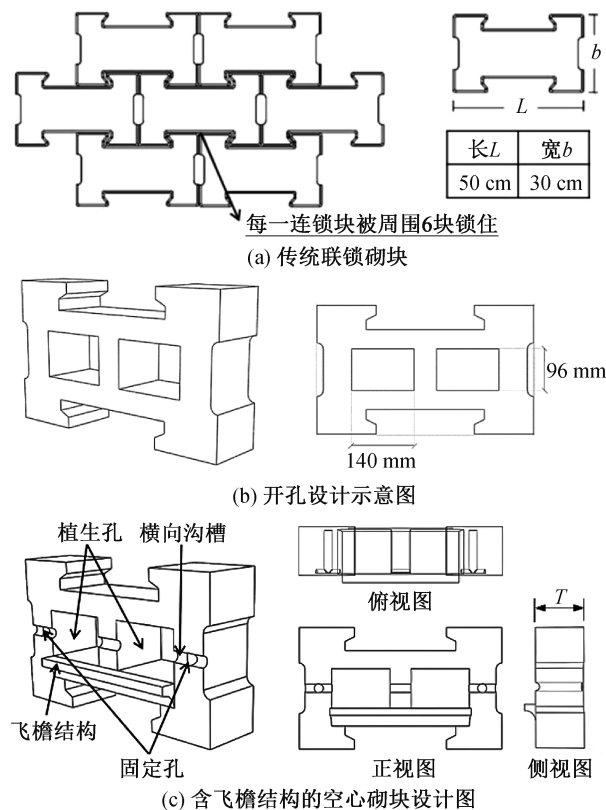


图2 砌块优化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of block optimization

### 2.1 开孔设计

植生孔及透水沟槽的设计有助于增强砌块坡面的透水能力和生态功能,同时可有效消散护坡面层顶部和底部之间的水压差,降低波浪引起的

浮托力。当岸坡土基稳定性较差时,孔洞设计也能适应基土发生小幅度沉降引起的变形。此外,砌块两侧的孔洞可打入固定钢杆,以增强单独砌块的稳定性。参考传统砌块的整体尺寸与嵌锁结构设计,在确保结构稳固、外形美观的前提下,砌块的开孔率取 16%,开设植生孔的单孔尺寸为 140 mm×96 mm,砌块设计厚度为 120 mm。

## 2.2 飞檐尺寸

飞檐下端为弧面形结构,该设计不仅提升了美观性,而且能有效阻挡水波直接冲入植生孔,减缓波浪爬升到砌块底部时对砌块的冲击力。使用 PFC 离散元软件模拟砂土颗粒在植生孔中的堆积形态,结合物理力学计算,可确定飞檐尺寸的范围,如图 3(a)所示。构建一个放置在边坡上的植生孔,使用 PFC 离散元软件从孔口位置布置一定量的饱和状态的砂土颗粒,给颗粒施加重力作用,同时扣除浮力,使其回落入植生孔并逐渐堆积,稳定后的堆积形态如图 3(b)所示。根据颗粒回落形态,可将堆积体简化为半圆锥体进行体积计算。由自然剪切角理论可知,颗粒堆积体切面三角形的锐角可近似视为饱和土体内摩擦角。

本工程护岸所受波浪反压力最大值  $P_{\max}$  约为 5.155 kPa,砌块开孔面积  $A$  为 0.013 91 m<sup>2</sup>,因此,作用于开孔面积上的反压力为 71.78 N。采用体积法可得到与该力大小相等的土的重力,见式(1)。

$$D = \frac{P_{\max} \cdot A}{\gamma_{\text{sat}} \cdot \cos\alpha \cdot A_{\text{hole}}} \quad (1)$$

$$F_1 = G \times \cos\alpha \quad (2)$$

$$F_1 = \gamma_{\text{sat}} \cdot V \quad (3)$$

式中: $D$  为坡面至孔底的直线距离,即冲刷深度,cm; $\gamma_{\text{sat}}$  为土的饱和重度,kN/m<sup>3</sup>,本文取 18.816 kN/m<sup>3</sup>; $\alpha$  为坡面与水平面的夹角,(°); $A_{\text{hole}}$  为植生孔开孔面积,cm<sup>2</sup>,本文取 139.1 cm<sup>2</sup>; $F_1$  为土的重力沿

垂直坡面方向的分力,N; $G$  为土的重力,N; $V$  为波浪反压力可带出的土的体积,cm<sup>3</sup>。

根据式(1)一式(3)计算得到,波浪反压力可带出的土的体积  $V$  为 4 257.6 cm<sup>3</sup>, $D$  为 30.6 cm,因此,波浪反压力一次性最多可能冲刷带出 30.6 cm 深的土。如果部分被冲蚀的土体被飞檐拦截后回落到植生孔中,将会先填补冲刷形成的孔洞,其余部分才会在植生孔中堆积形成“半圆锥”状土堆。该土堆的底面半径最大为植生孔宽度。基于天然休止角理论,计算超出植生孔的长度  $l$  (即飞檐设计宽度),见式(4)一式(6)。

$$V_2 = V - V_1 \quad (4)$$

$$H = \frac{V_2}{A_{\text{hole}}} \quad (5)$$

$$h = \frac{9.6}{\tan\theta} \quad (6)$$

$$l = H + h - (D + T) \quad (7)$$

式中: $V_1$  为半圆锥体积,cm<sup>3</sup>,本文取 1 152.7 cm<sup>3</sup>; $V_2$  为回落土体体积,cm<sup>3</sup>; $H$  为砌块厚度方向的回落深度,cm; $T$  为砌块厚度,cm,本文取 12 cm; $h$  为土堆积长度,cm; $\theta$  为土体内摩擦角,(°),本文取 22°。

据此可计算出植生孔中锥体的高度  $h$  为 23.9 cm,超出植生孔的长度  $l$  为 3.6 cm。由于体积法是简化的理论计算方法,考虑到计算值与实际情况存在一定误差,同时还需兼顾工程的经济性、美观性等因素。因此,本文提出飞檐设计宽度的合理值域为 3.6~4.7 cm。

## 3 砌块稳定性数值模拟

### 3.1 研究区概化模型

沭河上游莒县护岸工程的坡比为 1:2,模型主要采用混凝土材料和岩土材料,并引入非线性

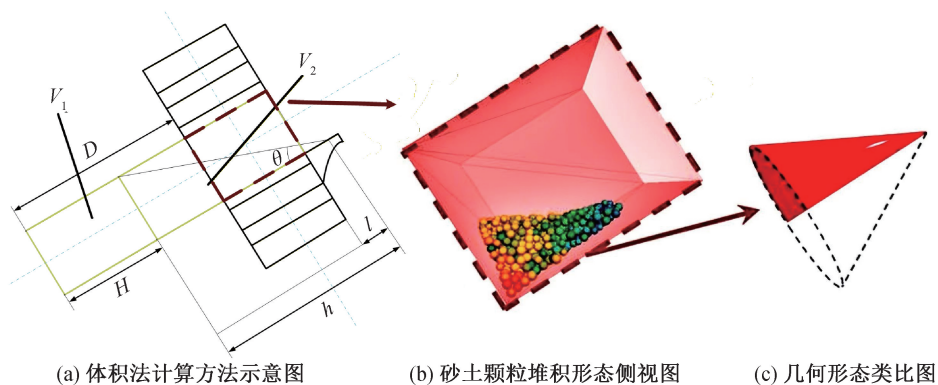


图 3 体积法计算方法

Fig. 3 Volumetric method of calculation

本构关系。在软件属性模块中,土体设置为摩尔-库仑塑性属性,其密度设置为饱和密度,弹性模量设置为 80 MPa,泊松比为 0.3;在摩尔-库仑参数中,黏聚力为 30 kPa,内摩擦角为 14°。混凝土材料采用弹性模型,密度为 2 360 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.15,弹性模量为 3×10<sup>4</sup> MPa。在不考虑坡体变形的情况下,将坡体的参数设置为刚性,连锁式混凝土砌块采用混凝土弹性模型,材料参数不变。

根据《堤防工程手册》<sup>[18]</sup>,完整坡面上存在一个波浪重点袭击区。如图 4 所示,B 为重点防护区,A、C 为防护区至坡底和坡顶的距离,重点袭击区下限为回落值 R<sub>d2%</sub> 处,上限则可定于比静水面高出 0.5H<sub>s</sub> 的位置。H<sub>s</sub> 代表波浪的有效平均波高;R<sub>dp</sub> 为波浪回落深度;R<sub>u2%</sub> 表示波浪爬高水平;H<sub>2%</sub> 是指有 2% 的概率会被超过的波高值,它是一个基于瑞利分布模型推算出的极端波高统计量。波浪参数根据工程区实际情况确定,通过查阅工程资料获得莒县险工段护坡工程设计波浪参数,具体见表 2。

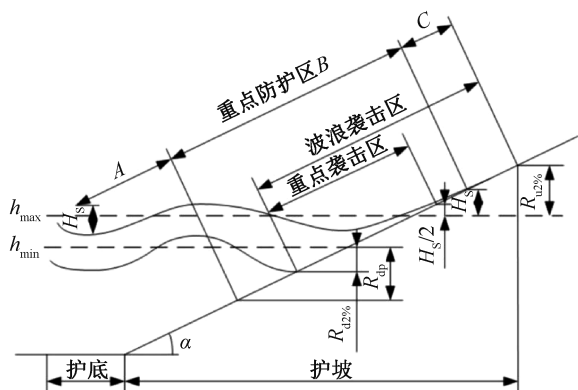


图 4 坡面重点防护范围示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the key protection area on the slope surface

表 2 波浪参数

Tab. 2 Wave parameters

计算风速/ (m · s <sup>-1</sup> )	风区长度/ m	平均波高/ H <sub>s</sub> /m	波高/ m	波长/ λ/m	设计波高/ m	超过波高/ H <sub>2%</sub> /m
19.00	13.2	0.69	1.32	21.50	1.568	1.517

按照瑞利 (Rayleigh) 分布, H<sub>2%</sub> = 1.4H<sub>s</sub>, 计算得到 H<sub>s</sub> 为 1.08 m, 则重点袭击区上限为静水面以上 0.54 m 处, 将该处确定为模拟区的上边界。

根据荷兰堤防设计<sup>[19]</sup>, 破碎波参数 ξ 的计算公式见式 (8)。

$$\xi = \frac{\tan\theta}{\sqrt{\frac{H_s}{\lambda}}} \quad (8)$$

经计算, ξ = 2.3 > 2, 因此 R<sub>d2%</sub> 为 1.5H<sub>s</sub>, 为 1.62 m, 即静水面以下 1.62 m 处确定为模拟区的下边界。根据实际护坡工程设计的静水位, 对整体防护边坡进行重点袭击区域选取后的 ABAQUS 三维实体模型见图 5。

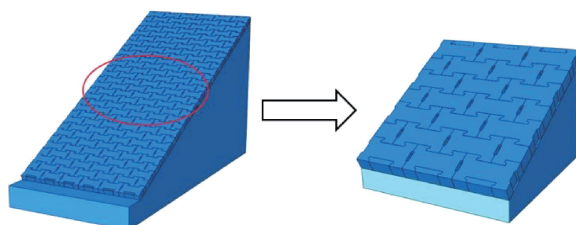
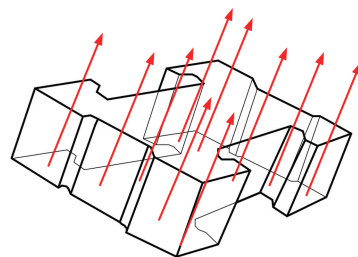


图 5 重点袭击区模型

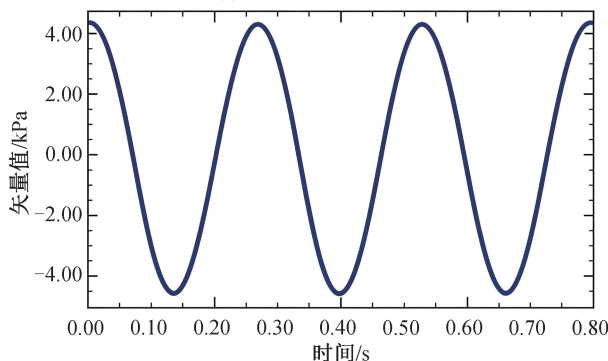
Fig. 5 Model of the key attack area

### 3.2 模型荷载

模型施加的荷载包括: 扣除浮力后的土体和混凝土砌块的重力、波浪荷载及摩擦力。其中, 波浪反压力以施加在砌块底部的正弦载荷表示, 其周期与波浪周期一致, 见图 6。摩擦力通过建模软件中相互作用模块的摩擦接触进行定义, 本模型考虑的相互作用包括砌块之间的接触、砌块与坡体的接触。砌块间采用通用接触设置, 接触方向为各向同性, 摩擦系数设置为 0.4。砌块铺设采用垫层结构, 由下至上依次为堤身、土工布、碎石、砌块。参照国内类似工程的试验资料, 各类材料间的摩擦系数取值如下: 混凝土砌块与砂土之间



(a) 砌块的载荷施加方式



(b) 施加载荷的变化形式

图 6 波浪反压力在模型中的体现

Fig. 6 Manifestation of wave counter-pressure in the model

为 0.33,混凝土砌块与土工布之间为 0.54,土工布与砂土之间为 0.51,碎石垫层和混凝土砌块之间为 0.70<sup>[20]</sup>。

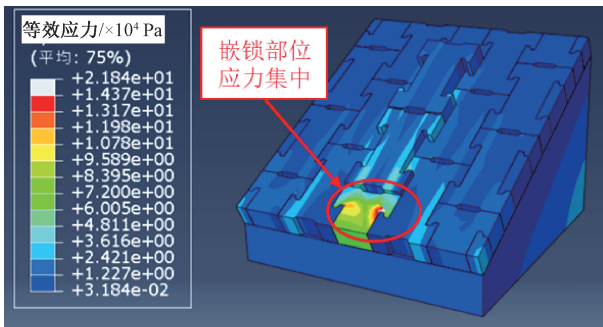
### 3.3 数值模拟结果与分析

在相同工况条件下,分别对传统连锁砌块在横置、竖置两种摆放情况,及本文提出的含飞檐结构的空心砌块坡面下进行数值模拟,得到的等效应力云图与等效位移云图分别见图 7 和图 8。

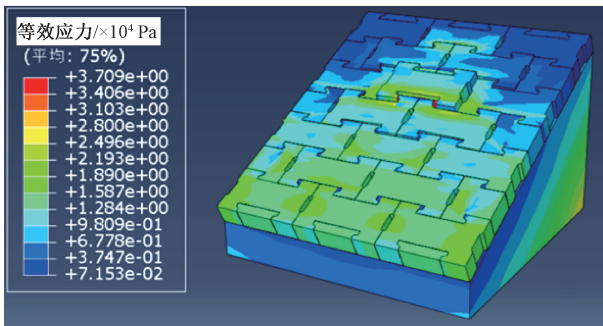
由图 7(a)(b)可知,砌块竖置排布时的最大应力值远大于横置排布,且应力集中发生在砌块嵌锁位置,而不是砌块面层。集中的应力极易导致砌块嵌锁作用失效,进而引发砌块面层失稳的问题。对比图 8(b)(c),当波浪反压力作用于开孔、闭孔两种砌块组成的护坡面的中央位置时,周围砌块产生的位移量较为接近,说明砌块的优化对于护坡面层的整体嵌锁性影响较小,防护效果

稳定。图 8(a)表明,砌块竖向放置时,在荷载作用下发生明显的不均匀位移,在波浪反复冲击下可能发生脱落,且砌块间的嵌锁作用较弱,易导致护面层整体失稳。优化后砌块的等效位移远小于传统砌块,说明优化处理后的砌块具有更好的削波减浪效果,其构成的防护结构具有更高的稳定性。图 8(b)(c)表明,砌块横向放置有助于增强砌块间的嵌锁能力,控制砌块的不均匀位移。

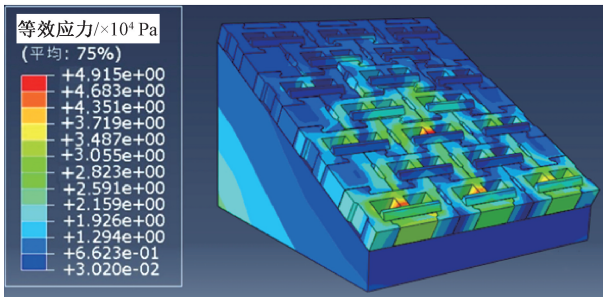
砌块优化前后的最大应力和最大位移见图 9。在相同工况下,对面层施加相等的波浪反压力,竖向铺设砌块明显不利于坡面稳定,因此在铺设砌块时应优先考虑横置形式。在砌块横置铺设时,植生孔改变了单体砌块的受力分布,最大应力出现在砌块中间处。新型砌块承受的最大应力比传统砌块提高 32.5%,但远低于 C30 混凝土的强度标准值,因此,应力的增加并不会影响砌块的结构稳定性。新型砌块的最大位移比传统砌块降低



(a) 砌块竖置



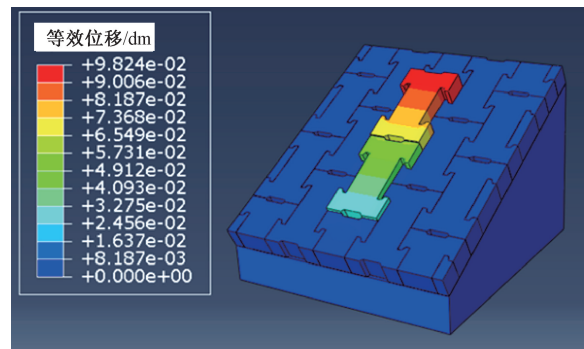
(b) 砌块横置



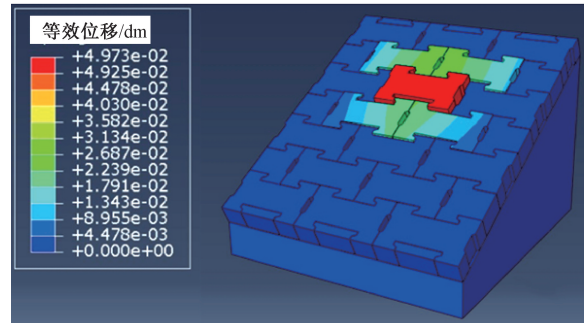
(c) 开孔横置

图 7 等效应力云图

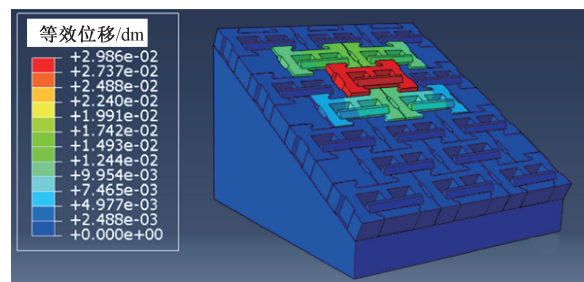
Fig. 7 Equivalent force cloud diagram



(a) 砌块竖置



(b) 砌块横置



(c) 开孔横置

图 8 等效位移云图

Fig. 8 Equivalent displacement diagram

39.8%。优化后的砌块具有良好嵌锁效果,其面层的抗冲刷能力大幅度增强,整体结构的抗失稳能力优于原始砌块。

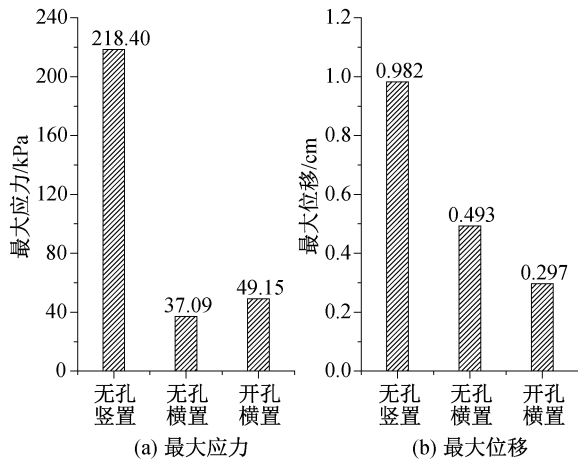


图9 数值模拟结果对比柱状图

Fig.9 Comparison histogram of numerical simulation results

## 4 结论

本文以沭河流域莒县段的河道护坡工程为例,分析河道坡面稳定性的影响因素。在传统连锁砌块的基础上,本文提出增加双植生孔与飞檐结构。通过 PFC 离散元软件模拟砂土颗粒在植生孔中的堆积形态,得到以下结论:

1) 研究区河岸坡面波浪反压力为 5.155 kPa。

2) 飞檐结构的设计宽度值域为 3.6~4.7 cm。

3) 砌块横置可增强护坡面层的整体稳定性,在砌块材料强度充足的情况下,含飞檐结构砌块护岸面的削波减浪能力大幅提升。植生孔能加强砌块内外水土交换,飞檐结构能减少实际护坡过程中波浪冲刷引起的水土流失。

## 参考文献:

[1] 张丽娟. 水利工程护坡生态化设计[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(4): 120-121.  
ZHANG L J. Ecological design of slope protection in water conservancy project[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(4): 120-121.

[2] 李国庆. 河道堤防传统护坡的创新形式及思路探讨[J]. 地下水, 2019, 41(5): 274-275.  
LI G Q. Discussion on innovative forms and ideas of traditional slope protection for river embankments [J]. Ground Water, 2019, 41(5): 274-275.

[3] 刘厚昌, 俞晓冬. 传统护岸与生态护岸的比较与展望[J]. 现代交通技术, 2011(S1): 78-81.

LIU H C, YU X D. Comparison and prospect of traditional revetment and ecological revetment [J]. Modern Transportation Technology, 2011(S1): 78-81.

[4] 沈红梅. 河道堤防的护坡形式研究[J]. 科技创新与应用, 2016, 6(25): 220.  
SHEN H M. Study on slope protection form of river embankment [J]. Technology Innovation and Application, 2016, 6(25): 220.

[5] 陈小燕, 易仲强. 贵州水利工程边坡防护措施探讨[J]. 水电与新能源, 2016, 30(4): 68-70.  
CHEN X Y, YI Z Q. Slope protection techniques adopted in water conservancy projects in Guizhou Province [J]. Hydropower and New Energy, 2016, 30(4): 68-70.

[6] 吴少玉. 河道堤防的护坡形式研究[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(2): 79-81.  
WU S Y. Study on river course dike revetment type [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2019, 47(2): 79-81.

[7] 陈传亮. 混凝土砌块护坡在水利工程中的应用[J]. 散装水泥, 2019(1): 58-59.  
CHEN C L. Application of concrete block slope protection in water conservancy project [J]. Bulk Cement, 2019(1): 58-59.

[8] 张玉清, 宓永宁, 徐锋, 等. 铰接式混凝土砌块护坡在北方地区的应用[J]. 人民黄河, 2008, 30(8): 87-88.  
ZHANG Y Q, MI Y N, XU F, et al. Application of articulated concrete block slope protection in northern China [J]. Yellow River, 2008, 30(8): 87-88.

[9] 尹刚, 何洋. 凹形连锁砌块在麒麟湖水库护坡中的应用[J]. 山东水利, 2016(5): 34-35.  
YIN G, HE Y. Application of concave interlocking block in slope protection of Qilinhu Reservoir [J]. Shandong Water Resources, 2016(5): 34-35.

[10] 乐迪成. 水利工程河道治理护岸防护施工技术[J]. 建材与装饰, 2019(13): 280-281.  
LE D C. Construction technology of river regulation and bank protection in water conservancy projects [J]. Construction Materials & Decoration, 2019(13): 280-281.

[11] 郑志禄. 混凝土砌块护坡在水利工程中的应用[J]. 中国水运, 2011(3): 140-141.  
ZHENG Z L. Application of concrete block slope protection in water conservancy project [J]. China Water Transport, 2011(3): 140-141.

[12] 吴美安, 孙勇, 李启涛. 混凝土砌块护坡护面层稳定厚度的计算方法[J]. 人民黄河, 2006, 28(1): 62-64.  
WU M A, SUN Y, LI Q T. Methods for calculation stable thickness of concrete protected slopes [J]. Yellow River, 2006, 28(1): 62-64.

- tion with audio-visual interactions through virtual reality simulations of soundscape and landscape experiences in urban, waterfront, and green environments[J]. *Sustainable Cities and Society*,2023,99:104929.
- [16] 范昭诗. 养老服务驿站内室内交互界面对老年人情绪及恢复性效益的影响研究[D]. 北京:北京建筑大学,2024.
- FAN Z S. A study of the effects of indoor interactive interfaces on the mood and restorative benefits of older adults in a senior care station [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2024.
- [17] BUXTON R T, PEARSON A L, ALLOU C, et al. A synthesis of health benefits of natural sounds and their distribution in National Parks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2021,118(14):e2013097118.
- [18] 徐婧雯,方旭艳. 基于分形理论的传统商肆建筑的形态对比分析[J]. *华中建筑*,2024,42(12):89-94.
- XU J W, FANG X Y. Comparative morphological analysis of traditional commercial buildings based on fractal theory[J]. *Huazhong Architecture*,2024,42(12):89-94.
- [19] SUN B. The analysis of synchronous and influencing factors on building facade opening and architectural design [J]. *Applied Mechanics and Materials*,2012,174/175/176/177:1619-1622.
- [20] LIANG Z Q, CHO T Y. A study on effects of architectural surface characteristics on sharp shape threat perception[J]. *Korea Institute of Design Research Society*, 2022,7(3):46-60.
- [21] NISAR H, ONG Y N, MAHMOOD D. Analyzing the effect of relaxing natural sounds on the human brain during alpha up-regulation neurofeedback training [C]//2024 IEEE 8th International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA). Kuala Lumpur, Malaysia:IEEE,2024:1-5.
- [22] HELFRICH R F, HUANG M, WILSON G, et al. Prefrontal cortex modulates posterior alpha oscillations during top-down guided visual perception[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2017,114(35):9457-9462.
- [23] MAREK S, DOSENBACH N U F. The frontoparietal network: function, electrophysiology, and importance of individual precision mapping [J]. *Dialogues in Clinical Neuroscience*,2018,20(2):133-140.

(责任编辑 唐彦彦)

(上接第60页)

- [13] 李建康. 粉煤灰再生混凝土护坡砌块的设计与应用研究[D]. 济南:山东大学,2020.
- LI J K. Design and application of fly ash recycled concrete revetment block[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [14] 姜健. H型重力互助式钢渣芯混凝土护岸砌块的设计与应用研究[D]. 济南:山东大学,2018.
- JIANG J. The design and application of H gravity mutual aid steel slag core concrete revetment block[D]. Jinan: Shandong University,2018.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of levee project: GB 50286—2013[S]. Beijing: China Planning Press,2013.
- [16] 戎伟,吴跃东,刘坚,等. H型预应力混凝土护岸桩现场试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023,40(1):15-20.
- RONG W, WU Y D, LIU J, et al. Research on field test of H-type prestressed concrete revetment piles[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*,2023,40(1):15-20.
- [17] 潘军宁,王登婷,吴美安,等. 波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2005(4):476-481.
- PAN J N, WANG D T, WU M A, et al. Experimental study on stability of concrete block revetment under wave action [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2005(4):476-481.
- [18] 毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- MAO C X. Dikes engineering manual [M]. Beijing: China Water & Power Press,2009.
- [19] 蒋宗燕,潘宝雄. 船行波的研究和研究趋势[J]. *中国港湾建设*,2000(6):34-38.
- JIANG Z Y, PAN B X. Study on ship waves and tendency of study [J]. *China Harbour Engineering*,2000(6):34-38.
- [20] 张玉清. 铰接式混凝土砌块护坡稳定性数值分析及应用研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2011.
- ZHANG Y Q. A study on numerical analysis of joint concrete block for slope protection and its application research[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2011.

(责任编辑 王利君)