

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241024006

# 滑坡碎屑流对透过性柔性网的冲击动力特征研究\*

王彬<sup>1,2</sup>, 苏立君<sup>1,2,3</sup>, 肖思友<sup>4</sup>, 田红艳<sup>1,2</sup>

(1. 山地自然灾害与工程安全全国重点实验室(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所), 四川 成都 610299; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中巴地球科学联合研究中心, 巴基斯坦伊斯兰堡; 4. 六盘水师范学院土木与规划学院, 贵州 六盘水 553004)

**摘要:** 柔性网是防治滑坡碎屑流的重要拦挡结构, 其透过性对碎屑流冲击动力学特征尚未得到充分关注。基于离散元法, 在不同来流Froude数和网径尺寸条件下, 开展了碎屑流对透过性环形柔性网的冲击试验, 建立了一种新型冲击力估算模型。结果表明: (1) 随着网径尺寸和Froude数的增加, 流动层颗粒从柔性网中通过的概率增加, 死区稳定性降低, 共同提升了柔性网的透过性; (2) 当来流Froude数小于4时, 碎屑流冲爬高度和冲击力对网径比并不敏感; 在Froude数大于4后, 随着柔性网对前端碎屑流透过能力增强, 峰值冲击力时刻流动层直接传递到柔性网上的动量和死区的堆积质量降低, 降低了流动层的冲击动力和死区的堆积静力; (3) 提出的分析模型可用于分析和估算碎屑流作用在透过性柔性网上的峰值冲击力。研究结果为柔性网的网径尺寸优化和结构设计提供了理论参考。

**关键词:** 滑坡碎屑流; 柔性网; 冲击力; 冲爬高度; 离散元

**中图分类号:** P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0071-13

## Research on the Impact Dynamics Characteristics of Landslide Debris Flows on Permeable Flexible Barriers

WANG Bin<sup>1,2</sup>, SU Lijun<sup>1,2,3</sup>, XIAO Siyou<sup>4</sup>, TIAN Hongyan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences), Chengdu 610299, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad, Pakistan; 4. School of Civil Engineering and Urban Planning, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China)

**Abstract:** Flexible barriers are important barrier structures for preventing and controlling landslide debris flows, but its permeability's effect on the impact dynamics characteristics of debris flows has not been sufficiently studied. Based on the discrete element method (DEM), impact tests of debris flows on permeable annular flexible barriers were conducted under different inflow Froude numbers and mesh sizes. A novel model for impact force estimation was then established. The results showed that: (1) as the mesh size and Froude number increased, the probability of flow layer particles passing

\* 收稿日期: 2024-10-24; 修回日期: 2024-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20603)、国家重点研发计划项目(2023YFC3008300)、贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般533)资助

作者简介: 王彬(1993—), 男, 博士研究生。主要从事山地灾害防治等研究。E-mail: sanshan.wangbin@outlook.com

通信作者: 苏立君(1976—), 男, 研究员, 博导。主要从事山地灾害动力学及其防控等研究。

E-mail: sulijun1976@163.com

through the flexible barriers increased and the stability of the dead zone decreased, collectively enhancing the permeability of the flexible barriers. (2) When the inflow Froude number was less than 4, the debris flow climbing height and impact force were not sensitive to the mesh size ratio. However, when the Froude number exceeded 4, as the permeability of the flexible barriers to the front-end debris flow enhanced, the momentum directly transferred from the flow layer to the flexible barriers and the accumulated mass in the dead zone at the peak impact moment decreased, thereby reducing the hydro-dynamic impact force of the flow layer and the hydro-static impact force of accumulation in the dead zone. (3) The proposed analysis model could be used to analyze and estimate the peak impact force of debris flows on permeable flexible barriers. The research findings provide theoretical guidance for mesh size optimization and structural design of the flexible barriers.

**Keywords:** landslide debris flow; flexible barrier; impact force; climbing height; discrete element

## 0 引言

近年来,受全球气候变暖加剧、冰川退化加速和地震频发等多重动力因素影响,高山峡谷地貌单元内崩塌、滑坡的数量和规模都显著增加<sup>[1]</sup>。这些灾害体在运动过程中极易崩解破碎,形成流动性极强和极具破坏力的碎屑流,严重威胁影响区域内线性交通工程和山区城镇居民的安全。如2017年6月四川茂县新磨村滑坡-碎屑流掩埋道路1500m,致使10人死亡和73人失踪<sup>[2]</sup>。柔性防护网由于安装便捷、后期维护成本低、能够适应各种复杂自然地形,作为一种经济高效的被动防治措施,已被广泛应用于防治滑坡-碎屑流。

为建立有效的柔性防护结构体系,国内外学者通过模型试验、数值模拟等方法,对灾害体流动特征和柔性网结构特征对冲击动力学的影响进行了深入的分析研究。L.Zhao等<sup>[3]</sup>在渝怀铁路田湾隧道附近对柔性网成功拦截小型滑坡碎屑流的案例进行了现场调查,分析认为柔性网抵抗滑坡碎屑流的最大承载能量是其抵抗落石或孤立块石的4倍;肖思友等<sup>[4-5]</sup>基于现场调查和离散元法(DEM)研究了副网、网片类型和耗能器对碎屑流冲击力学特征的影响。C.E.Choi等<sup>[6]</sup>从颗粒尺度探讨了柔性网片的刚度对降低冲击力微观机制:网片的大变形有利于延长碎屑物质与网片结构的相互作用时间,降低碎屑流的冲击荷载。D.R.Song等<sup>[7-8]</sup>通过离心机试验探讨了固体积分数、柔性网刚度等因素对碎屑流冲击动力学机制的影响规律。C.Liu等<sup>[9]</sup>使用离散元-有限元(DEM-FEM)耦合方法分析了初始体积密度、流深倾角和耗能器启动力对碎屑流冲击力的影响。

尽管柔性网不似桩林坝等具有连续开口的结构特征,无法实现对碎屑流的物质和能量沿程调控作用,但仍然具有一定的透过性。如从布鲁克公司(Geobruigg)开展的现场测试视频中,可观察到相当部分细小颗粒会以残余速度穿过柔性防护网<sup>[10]</sup>。然而受限于柔性防护网结构的复杂性,在研究过程对柔性网结构过于简化,如在模型试验中使用非透过性的柔性薄膜<sup>[7-8]</sup>,或在数值模拟中使用仅考虑液相通过的膜单元等效替代<sup>[11]</sup>。且目前主要集中在透过性对灾害体物质拦截效率的影响。如C.Wendeler等<sup>[12]</sup>基于缩尺模型试验总结了网径尺寸与固体拦截效率之间的关系;D.Tan等<sup>[13]</sup>通过DEM数值试验讨论了网径尺寸对颗粒堵塞机制的影响。在考虑网面透过性对冲击力学特征的影响方面,D.Y.Tan等<sup>[14]</sup>针对泥石流冲击柔性网,在传统动压力模型的基础上考虑部分固相透过柔性网,建立了修正的动压力模型。然而,碎屑流在冲击过程中伴随着固体颗粒的堆积效应,堆积区的静荷载对冲击力的贡献不可忽略。因此,柔性网透过性的改变对碎屑流冲击动力学特征的影响依然值得深入研究。

为此,本研究采用离散元法,开展碎屑流对不同网径尺寸条件的柔性防护网的冲击试验,探索柔性网的透过性对碎屑流冲击力学特征的影响,为滑坡碎屑流的防治工作提供理论支撑。

## 1 考虑柔性网透过性冲击力分析模型

如图1所示,作用在柔性网上的冲击力 $F_0$ 由两部分组成:堆积在网后的死区作用在柔性网上的静

力分量  $F_{sta}$ ; 以及流动层颗粒直接冲击柔性网引起的动力分量  $F_{dyn}$ 。

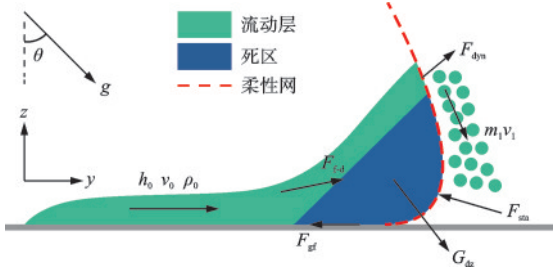


图1 考虑柔性网透过性冲击力组成分析示意

Fig.1 Schematic diagram of impact force composition analysis considering the permeability of flexible barriers

对死区整体进行受力分析,作用在死区上的作用力包括死区自重  $G_{dz}$ 、基底摩擦阻力  $F_{gf}$ 、流动层作用在死区上的动态冲击力  $F_{fd}$ 、以及柔性网对死区的支撑反力  $R$ ,基于  $Y$  方向上的静力平衡方程有:

$$\sum F_y = F_{fd} + G_{dz} \sin \theta - F_f + R = 0 \quad (1)$$

$$F_f = \mu_{dz} G_{dz} \cos \theta \quad (2)$$

式中,  $\mu_{dz}$  为死区颗粒与基底之间的摩擦系数。

将式(2)代入到式(1)中,得到死区作用在柔性网上静力分量  $F_{sta} = -R$  计算表达式为:

$$F_{sta} = F_{fd} + G_{dz} \cos \theta (\tan \theta - \mu_{dz}) \quad (3)$$

肖思友等<sup>[15]</sup>在研究碎屑流冲击立式挡墙的力学特征时,发现死区颗粒对流动层颗粒具有显著的摩擦缓冲作用。同时借鉴 Y.J.Jiang 等<sup>[16]</sup>的研究结论:流动层作用在死区上的动态冲击力  $F_{fd}$  对碎屑流冲击力的贡献并不显著。因此式(3)可进一步简化为:

$$F_{sta} = G_{dz} \cos \theta (\tan \theta - \mu_{dz}) \quad (4)$$

通过分析流动层颗粒在冲击过程前后的动量变化,应用动量定理可快速估算碎屑流作用在柔性网上的动力分量  $F_{dyn}$ 。记初状态下碎屑流流深、流速和体积密度分别为  $h_0$ 、 $v_0$  和  $\rho_0$ ,斜槽宽度为  $w$ 。在冲击过程中做如下假设:(1)忽略碎屑流的体积效应,实际冲击过程中贡献碎屑流流动压力的有效流动长度为  $L$ ,对应流动体质量为  $\rho_0 h_0 w L$ ; (2)在持续冲击的  $\Delta T$  时间段内,从柔性网中透过的颗粒累积质量为  $m_1$ ,等效平均速度为  $v_1$ ; (3)余下部分颗粒被拦截在柔性网后形成死区,速度降低为 0。基于上述假设,对有效流动体应用动量定理有:

$$m_1 v_1 - \rho_0 h_0 w L v_0 = \int_0^{h_1} \sigma_{xx1} dx w \Delta t - F_{dyn} \Delta t \quad (5)$$

式中,  $\int_0^{h_1} \sigma_{xx1} dx$  为初状态下碎屑流的侧向土压力,并假设侧向土压力为各向同性分布,即土压力系数  $k=1$ ,因此有:

$$\int_0^{h_1} \sigma_{xx1} dx = 0.5 \rho_0 g h_0^2 \cos \theta \quad (6)$$

将式(5)代入到式(4)中,得到流动层的冲击动力  $F_{dyn}$  的计算表达式为:

$$F_{dyn} = \frac{(\rho_0 h_0 v_0 w L - m_1 v_1)}{\Delta T} + 0.5 \rho_0 g h_0^2 w \cos \theta \quad (7)$$

将式(4)和式(6)相加,得到任意时刻碎屑流作用在柔性网上的冲击力  $F_b$  的计算表达式为:

$$F_b = G_{dz} \cos \theta (\tan \theta - \mu_{dz}) + \frac{\rho_0 h_0 w L v_0 - m_1 v_1}{\Delta t} + 0.5 \rho_0 g h_0^2 w \cos \theta \quad (8)$$

## 2 研究方法

在实际工程应用中,ROCCO 环形网因其较大的变形能力和较高的承载力而被广泛使用。图 2 为工程实例中具有不同网径尺寸的环形柔性防护网<sup>[17-18]</sup>,典型 ROCCO 环形柔性防护网结构主要由环形网片、横向支撑索、侧向固定索、减压环和固定锚点组成。鉴于本研究主要关注网面透过性对碎屑流冲击动力学特征的影响,因此在模型试验和 DEM 法中对柔性网进行合理的简化是必要的。

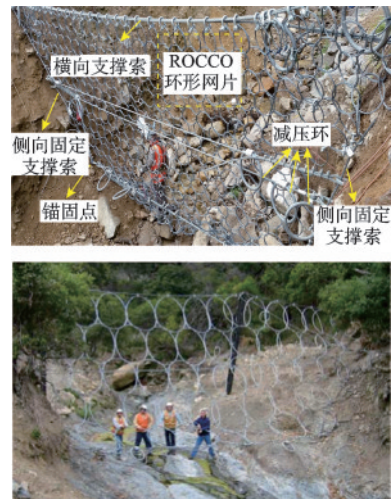


图2 不同网径尺寸的环形柔性网

Fig.2 Annular flexible barriers with different mesh sizes

### 2.1 柔性网建模与接触参数

无滑移的 Hertz-Mindlin 模型用于模拟颗粒与颗粒、颗粒与几何体之间的基本接触关系。组成环



形柔性网颗粒通过 Hertz-Mindlin 黏结键连接在一起。Hertz-Mindlin 黏结接触模型(图 3(e))可传递拉力、弯矩和剪力,当黏结键所受到最大法向力,或

最大切向力大于设定的最大黏结力时,黏结键断裂,此后颗粒的基础模型为无滑移的 Hertz-Mindlin 接触模型。

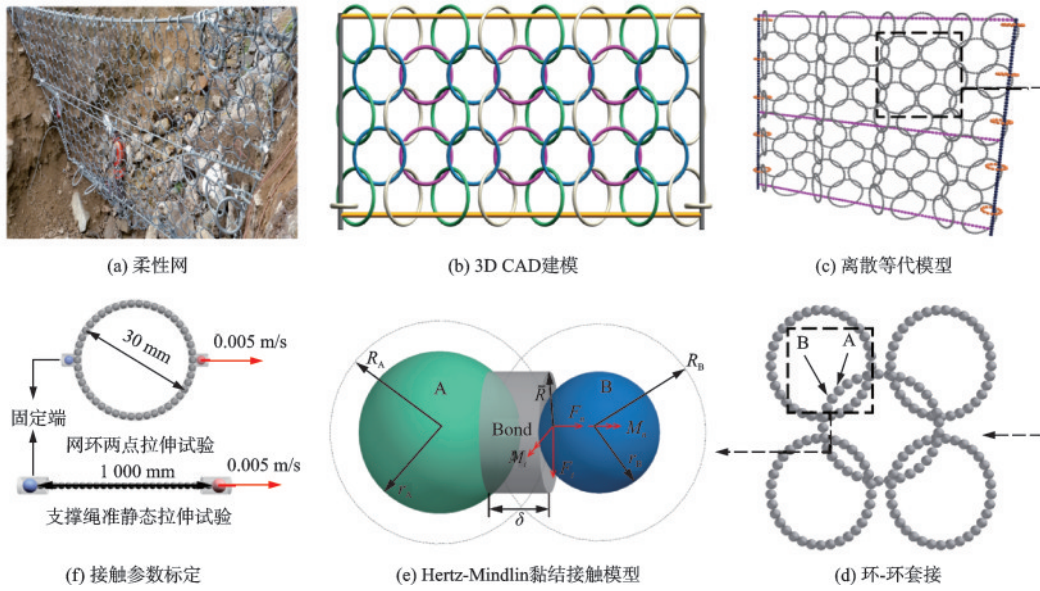


图3 环形柔性网离散元等效模型

Fig.3 Discrete element equivalent model of annular flexible barriers

如图 3 所示,环形柔性网建模的主要步骤为:  
 (1)在合理简化柔性网的结构基础上,计算组成柔性网各部件的颗粒尺寸,使用 3D CAD 软件定位柔性网各部件的三维空间坐标。对于环形柔性网,每一个网环均为独立的可变形单元,且相邻圆环之间、支撑绳索和单个圆环之间都存在摩擦滑动、碰撞和拉伸作用。因此在 CAD 几何建模阶段,确保网环和网环、网环和支撑索之间相互套结,并预留一定的间隙避免碰撞。对于柔性网减压环的简化,忽略其具体的几何形状,通过在侧向固定索颗粒和支撑索颗粒之间嵌入一枚黏结键来模拟减压环的力学性能;(2)基于开源 Python 语言求解柔性网颗粒的三维空间坐标后,通过 API 将颗粒信息导入到 EDEM 中,生成的柔性网如图 3(c)所示。由于每个部件的颗粒尺寸已经确定,因此通过改变颗粒密度的方式,使得颗粒的总质量与单个部件的质量相等。数值模拟中相关材料物理参数见表 1;(3)输入黏结接触参数生成黏结键。对于柔性网减压环的简化,忽略其具体的几何形状,通过在侧向固定索颗粒和支撑索颗粒之间嵌入一枚黏结键来模拟减压环的力学性能。

碎屑流与柔性网相互作用的接触和黏结参数

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料类型	颗粒粒径/ mm	颗粒密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/ Pa	泊松比
碎屑流	2~10	2 650	1.9e6	0.20
网环	1.00	7 900	2.3e6	0.15
支撑索	1.50	7 900	2.3e6	0.15
固定索	1.50	1e15	2.3e6	0.15
滑槽	/	2 500	2.5e4	0.25

通过一系列标定实验获取得到,基于单个网环的两点拉伸试验和支撑绳索的准静态拉伸试验(图 3(f))标定 Hertz-Mindlin 黏结键的刚度和临界断裂应力;碎屑流颗粒的静摩擦系数、动摩擦系数则通过抬板试验和堆积角试验联合标定,标定后的颗粒之间的接触参数和组成柔性网的黏结参数分别见表 2、表 3。

表 2 颗粒接触参数

Table 2 Particle contact parameters

接触对	静摩擦系数	滚动摩擦系数	恢复系数
碎屑流-碎屑流	1.33	0.12	0.50
碎屑流-柔性网	0.42	0.05	0.50
柔性网-柔性网	0.05	0.01	0.50

表3 黏结接触对黏结参数

Table 3 Bonding parameters of bonding contact pairs

黏结接触对	法向刚度/ ( $N \cdot m^{-3}$ )	切向刚度/ ( $N \cdot m^{-3}$ )	临界法向应力/ Pa	临界切向应力/ Pa	黏结半径/ mm
网环-网环	1.5e9	7.5e8	3e15	1.5e15	3.5
支撑索-支撑索	2.0e9	1.0e9	3e15	1.5e15	7.5
支撑索-固定索	3.0e9	1.5e9	4e15	2.0e15	7.5

## 2.2 模型验证

通过对比物理模型试验和DEM数值结果的差异性进行验证参数的可靠性。如图4(a)所示,模型试验中斜槽宽度为325 mm,高度为650 mm,柔性网安装在距离闸门3.5 m处。环形柔性网的结构组成如图4(b)所示,柔性网由189个直径为30 mm的钢丝小圆环(丝径1.5 mm)和6根横向支撑索编织而成。支撑绳索在柔性网上均匀分布,相邻支撑绳索间距为120 mm。每根支撑索都预留100 mm的冗余变形,代替柔性网上的耗能元件,即每根支撑索长度设置为425 mm。每根支撑绳索的一端连接称重传感器,用于监测冲击-爬升过程柔性网的拉

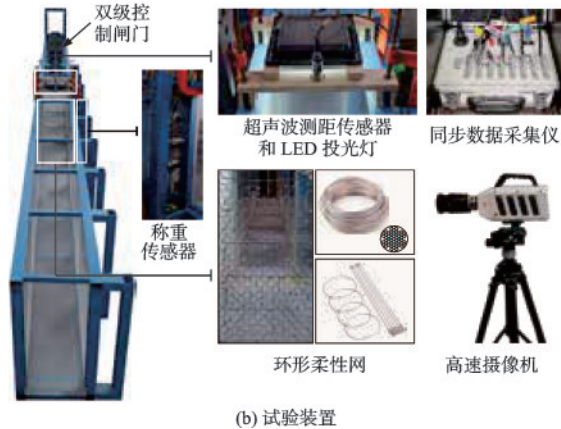
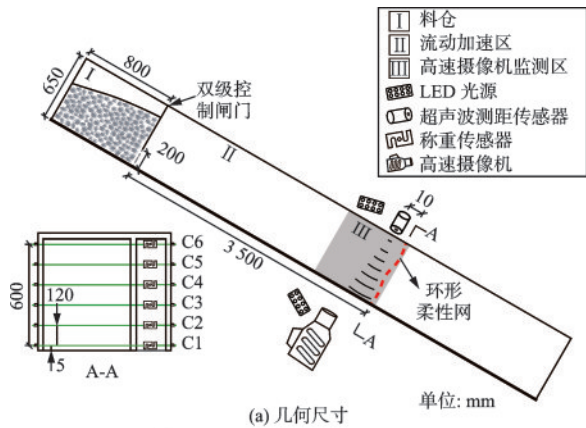


图4 物理模型试验

Fig.4 Physical model experiment

力,最后反算碎屑流作用在柔性网上的冲击力。在斜槽顶端固定一超声波测距传感器,跟踪监测碎屑流的冲爬高度。试验中采用高速摄像机记录试验过程。碎屑流试验材料由粒径为2~20 mm的天然砾石材料组成(内摩擦角为34°,界面摩擦角为20°),质量为86 kg。相应的,在标定DEM试验中与模型试验中保持相同的配置。

如图5(a)所示分别为斜槽坡度为35°、40°和45°时模型试验和DEM中的冲击力时程曲线。对比结果表明:冲击力均呈现为先快速上升至峰值,后逐渐衰减至恒定值的趋势,峰值冲击力计算误差在5%以内。表明标定后的参数可较好的反映碎屑流的冲击特征。另外如图5(b)所示,斜槽倾角为40°时二者最终的堆积形态也基本一致,表明应用本研究标定的参数可以较为准确反演冲击过程中碎屑流死区形成、演化和堆积特征。

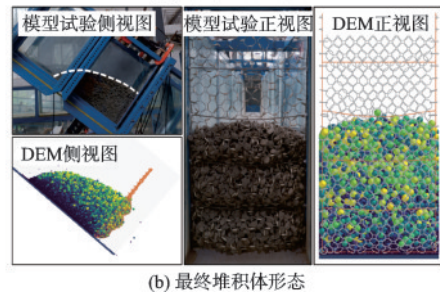
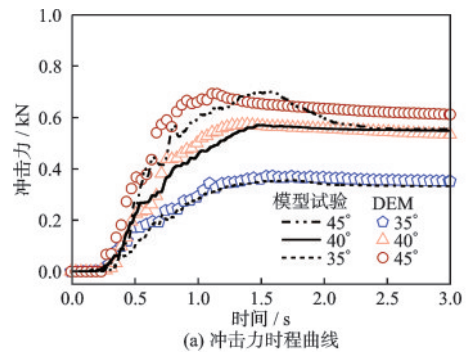


图5 DEM数值模拟与模型试验堆积结果对比

Fig.5 Accumulation result comparison of DEM numerical simulation and model test

基于碎屑流的整体行为标定后的摩擦接触参数,不受颗粒形状和颗粒缩放尺度的影响,可为应用DEM研究地球物理流的流动和冲击动力学机制中参数标定和设置提供参考。

## 2.3 数值模拟设计与计划

Froude 数是表征碎屑流动力和冲击特征的关键无量纲参数,其计算表达式为:



$$Fr = \frac{v_0}{gh_0 \cos \theta} \quad (9)$$

式中,  $v_0$  为来流深度平均速度;  $g$  为重力加速度;  $h_0$  为流深;  $\theta$  为斜槽倾角。

采取传统的“溃坝”的方式虽然可以较为真实的模拟完整的碎屑流启动、加速传播和冲击爬高过程,但也存在如下问题:(1)由于碎屑流在流动过程中总是呈现出碎屑流流动前端速度大,主体部分速度则显著低于锋面速度,因此碎屑流的最大流深和最大速度并不处于同一剖面上,导致目前对于流深  $h_0$  和流速  $v_0$  的准确测量和取值没有形成统一的认识,如在 Y.J.Jiang 等<sup>[16]</sup>及肖思友等<sup>[15]</sup>的研究中认为应取峰值冲击力时刻后续稳定来流的向流深和流速;而 S.R.Goodwin 等<sup>[19]</sup>则分别取流动前端速度和碎屑流主体部分的最大流深来计算 Froude 数。不同的测量方法会得到不同的 Froude 数,不利于参数分析。(2)另外 C.E.Choi 等<sup>[20]</sup>的研究表明,由于尺寸效应的限制,采用缩尺的模型试验或数值模拟难以在防护结构前生成 Froude 数小于 3 的碎屑流。为方便开展参数化研究,本研究通过外部导入碎屑流颗粒直接在柔性网前生成具有目标流态的碎屑流流动体。既有研究表明<sup>[21-23]</sup>,碎屑流主体表现为密集流态,在具有不同 Froude 数还伴随着特定范围的 Savage 数 ( $\leq 0.01$ ) 和体积分数 (0.4~0.6),因此为了尽量反映真实中状态下碎屑流的流动特征,控制初始流动体的 Savage 数为 0.01,体积分数约 0.42。

生成具有指定 Froude 数碎屑流流动体和建模过程为:(1)通过“落雨法”在长度为 3 500 mm、宽度为 325 mm、高度为 100 mm 的长方体料仓内随机生成颗粒(图 6(a)),颗粒在重力作用下自由下降并在料仓底部逐层堆积,当颗粒堆积填满料仓后,停止生成颗粒,用于提取最终状态下料仓内颗粒的坐标和半径。碎屑流由平均直径  $d_{50} = 15$  mm 的单分散颗粒组成,其粒度分布在  $(0.85 \sim 1.15)d_{50}$  范围内变化,并服从高斯分布;(2)根据预先设定的流深 ( $h_0 = 75$  mm) 和颗粒体积分数删除多余的颗粒后,通过式(9)计算碎屑流的深度平均速度,根据 Savage 数的取值范围,反算碎屑流从基底到表面的速度梯度,然后分层将速度梯度赋值给碎屑流颗粒,即可得到具有目标流态下的碎屑流(图 6(b))。根据既有的颗粒流的监测数据,碎屑流主体部分以密集流为主,故本文中对于密集流态下的碎屑流 Froude 数变化范围在 1~9,相应的深度平均速度变化范围为 0.69 ~ 6.23

m/s;(3)具有目标流动特性的碎屑流生成后,在流动前缘导入不同网径尺寸的柔性网。

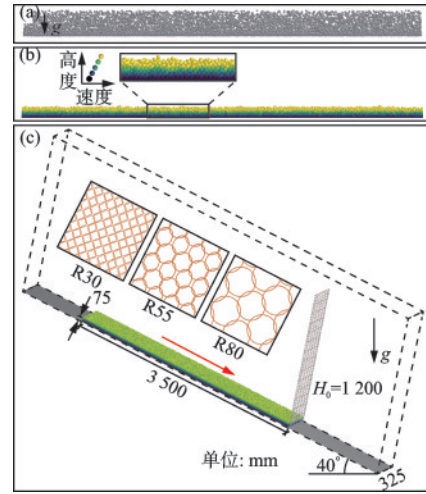


图 6 DEM 数值模拟模型设计

Fig.6 Model design of DEM numerical simulation

对于网径尺寸的考虑,设计了三种网环直径分别为 30、55、80 mm 的柔性网(图 6(c)),对应网环与碎屑流粒径的比值(相对网径比)分别为 2.0、3.6 和 5.3。如表 4 所示,共开展了 27 组 DEM 数值模拟试验,对于网环直径为 30 mm, Froude 数为 6 的试验,试验编号为 R30F6,其它试验组编号以此类推。DEM 数值试验中斜槽宽度为 325 mm,约为碎屑流平均直径的 21.67 倍,有效避免了侧壁效应对结果的影响。由于使用较低的杨氏模量对冲击力和冲爬高度的结果影响很小,因此在本研究中为提高计算效率,碎屑流颗粒的杨氏模量远低于实际值。试验中碎屑流颗粒总质量为 100 kg,碎屑流颗粒数目为 21 351 个,物理模拟时间为 1.0 s,时间步长为  $2e-10$  s,数据保存间隔为 0.01 s,在 16 核 AMD CPU (3.20 GHz) 移动工作站上的计算时间为 8~12 h 不等。

表 4 DEM 数值模拟计划

Table 4 DEM numerical simulation plan

网径尺寸 $R_{net}/mm$	Froude 数	速度 $v_0/(m \cdot s^{-1})$	流深 $h_0/mm$	体积分 数 $\phi_0$
30	1	0.69	75	0.42
	2	1.39		
	3	2.09		
55	4	2.79		
	5	3.49		
	6	4.19		
80	7	4.89		
	8	5.59		
	9	6.23		

### 3 数值模拟结果与分析

#### 3.1 碎屑流冲击和运动过程

目前对死区的识别仍以基于临界速度的方法为主,考虑到从网环中流出的颗粒的速度具有极强的随机性,选用稳定来流的初速度  $v_0$  作为临界速度,死区由位于柔性网后且速度小于  $0.05 v_0$  的颗粒组成,死区之外的颗粒划分为流动层。如图 7 所示为不同网径尺寸条件下碎屑流冲击运动过程。碎屑流的冲击过程均可划分为锋面碰撞、冲击爬高和堆积阶段。

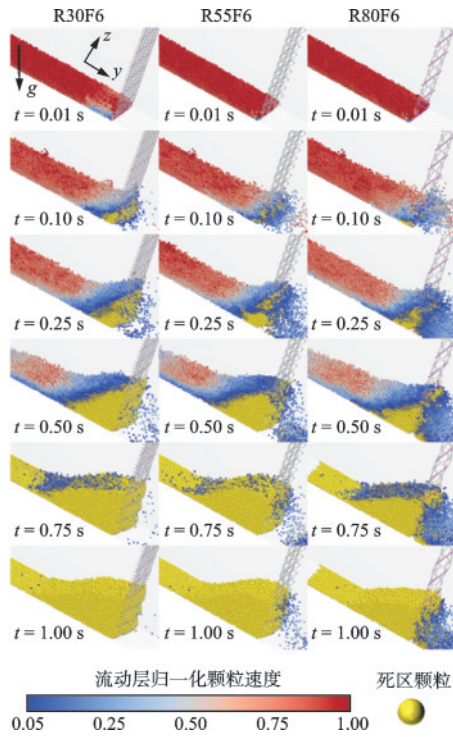


图 7 不同网径尺寸下碎屑流冲击-爬升运动过程

Fig.7 Impact-climbing motion process of debris flows under different mesh sizes

在锋面碰撞阶段( $t=0.01 \sim 0.10$  s),碎屑流颗粒柔性网接触柔性网后,部分颗粒从网环内以中高速飞溅而出,且网环尺寸越大,从柔性网中透过的颗粒越多,相应的被拦截在柔性网逐步堆积形成的死区颗粒越少;相对而言,网径尺寸越小,越容易在柔性网后形成连续且相对较稳定的死区,如在  $t=0.10$  s 时刻,在 R30F6 工况下已经在柔性网后已形成了三角形的死区,然而在 R55F6 工况和 R80F6 工况下,流动前端的大部分颗粒依然倾向于从网环

中流出,仅少部分颗粒堆积在柔性网。

随着死区在  $-Y$  和  $Z$  方向上的扩展,进入到冲击-爬高阶段( $t=0.25 \sim 0.50$  s)后,在 R30F6 工况下,已形成的死区处于相对稳定状态;而在 R55F6 和 R80F6 工况下的死区中则混杂着相当部分速度大于  $0.05 v_0$  的颗粒。如图 8 所示,在冲击过程中,死区导致流动层颗粒在  $Y$  方向上的平均速度持续降低,且不同网径比条件下  $Y$  方向速度几乎相等,而在  $Z$  方向上的速度则随着网径比的增加而降低。

最后随着死区的扩展,死区形态逐渐由三角形状转换为楔形状,仅有少许后续来流可沿死区表面运动至柔性网,且在迁移过程中伴随着沉积行为。小网径比条件下,在无后续来流时,已形成的死区相对稳定。随着网环直径的增加,死区颗粒过渡到欠稳定状态,仍然能观察到部分颗粒透过柔性网流向下游。

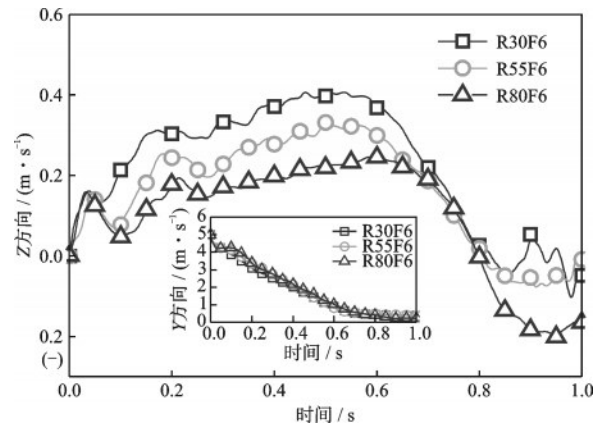


图 8 流动层平均速度演化时程曲线

Fig.8 Time history curves of average velocity evolution of flow layer

#### 3.2 死区演化规律与特征

为进一步评价网径尺寸对碎屑流死区形成和演化的微观机制的影响,提出死区颗粒接触耐久度 ( $C_{dz}$ ) 作为衡量死区颗粒接触稳定性的无量纲评价指标,其计算公式为:

$$C_{dz} = \frac{N_c^{i,i+1}}{N_c^i} \quad (10)$$

式中,  $N_c^{i,i+1}$  为在第  $i$  和  $i+1$  个时间步中同时存在的颗粒接触对的总数量;  $N_c^i$  则为第  $i$  个时间步中死区颗粒接触对的总数目。当  $C_{dz}$  等于 1 时表明第  $i$  个时间步中所有接触对都存在于第  $i+1$  个时间步中,颗粒间表现为完全摩擦接触,死区处于准静态或相

对稳定状态;反之 $C_{dz}$ 等于0则意味着第*i*个时间步中所有接触力链在第*i*+1个时间步中全部断裂,颗粒间为完全碰撞接触且重排程度高;介于0和1之间则表征颗粒之间碰撞和剪切摩擦作用共存。

如图9(a)所示为Froude数等于6时不同网径尺寸条件下死区接触耐久度时程演变曲线。在R35F6工况下, $C_{dz}$ 在锋面撞击阶段迅速上升,而后缓慢增加到1后保持不变,表明死区在冲击过程中逐渐趋于稳定状态,颗粒间形成稳定的力拱,并完全堵塞网环。当网径尺寸从30 mm增加到80 mm时,相对网径比从2.0增加到5.3,接触耐久度波动程度增加,表明网径尺寸的扩大加剧了死区内颗粒接触力链的破坏和重建过程;颗粒接触耐久度平均降幅约30%,反映了网径比的增加使得稳定力拱破坏的概率增加,促进了死区内颗粒的重排程度,导

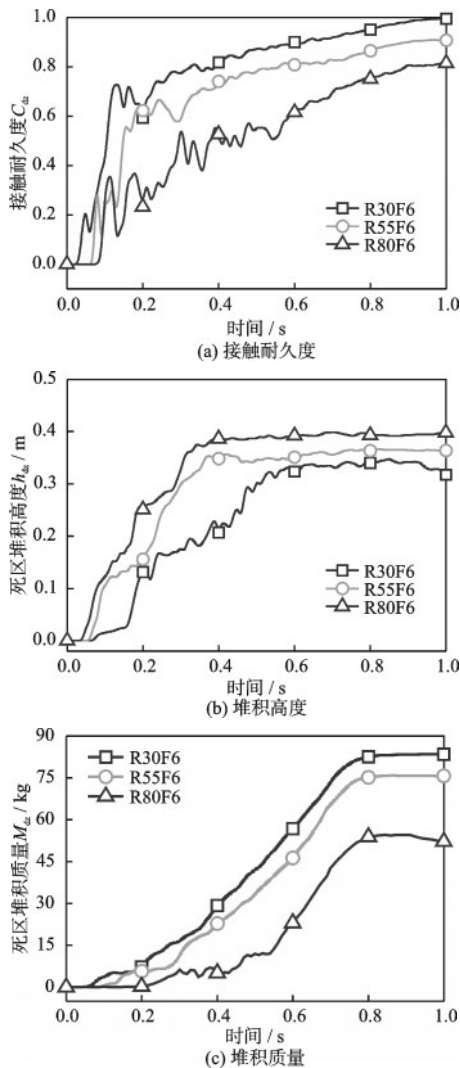


图9 死区演化特征

Fig.9 Evolution characteristics of dead zone

致位于网前的部分死区颗粒在失去平衡后流向下流。因此,在来流Froude数一定时,在整个冲击过程中死区的堆积高度 $h_{dz}$ 和堆积质量 $M_{dz}$ 也随着网径尺寸的增加而降低(图9(b)、(c))。

死区的最大堆积高度则决定了柔性网的设防高度,如图10所示统计了碎屑流的归一化峰值冲爬高度 $h_{dz}^{max}/h_0$ 与Froude数和网径尺寸的关系,结果表明死区堆积高度随着Froude数的增加呈线性增加的趋势,当Froude数小于4时,网径比对死区堆积高度的影响并不显著;在Froude数大于等于4后,死区堆积高度随网径比的增加而降低,且Froude数越大,降低效果越显著。

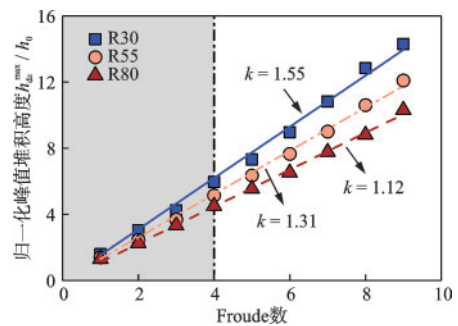


图10 死区最大堆积高度与Froude数和网径尺寸的关系

Fig.10 Relationship between maximum accumulation height of dead zone, Froude number, and mesh size

### 3.3 网面过流特征

如图11(a)所示,相对网径比对柔性网下游出口处碎屑流的质量流量影响显著。在网径尺寸为30 mm时,碎屑流几乎完全堵塞柔性网面,仅局部极少量流动层颗粒从网面中流出;在锋面撞击阶段,从柔性网中透过的颗粒以流动层颗粒为主,随着相对网径比的增加,流动层颗粒直接从柔性网中透过的概率增加,峰值质量流量也出现在此阶段;在达到峰值流量后,过流的颗粒主要来自于死区,网径比的增加使得死区稳定性降低,在自身重力、后续来流的冲击力以及柔性网回弹反力作用下力链网络更容易发生破坏,从而导致下游质量流量的增加。

定义柔性网对碎屑流过流效率(OE)为从柔性网流出的颗粒的累积质量 $M_{out}$ 与来流碎屑流总质量 $M_0$ 的百分比。如图11(b)所示,柔性网的过流效率还受来流Froude数的控制。来流Froude数越大,碎屑流携带的动能越大,在冲击过程中更容易破坏死区中的接触力链,从而增加颗粒从网环流处的概率。



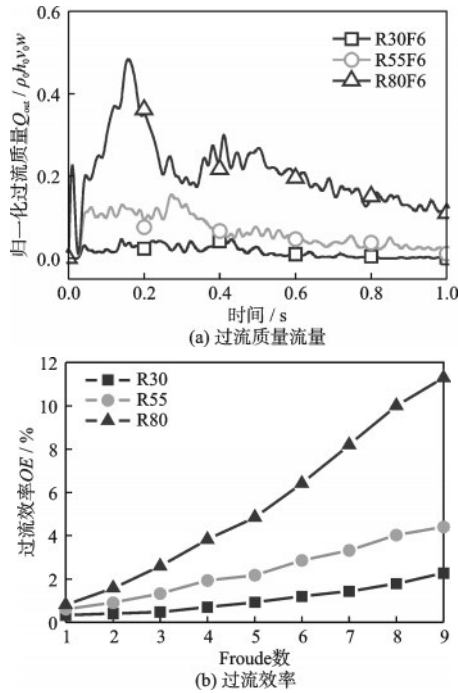


图 11 网径尺寸对碎屑流颗粒通过能力的影响

Fig.11 Effect of mesh sizes on the passing ability of debris flow particles

## 4 网径尺寸对冲击特征的影响

### 4.1 碎屑流动量与冲击合力演化

为明确冲击过程中碎屑流动量演化及其传递

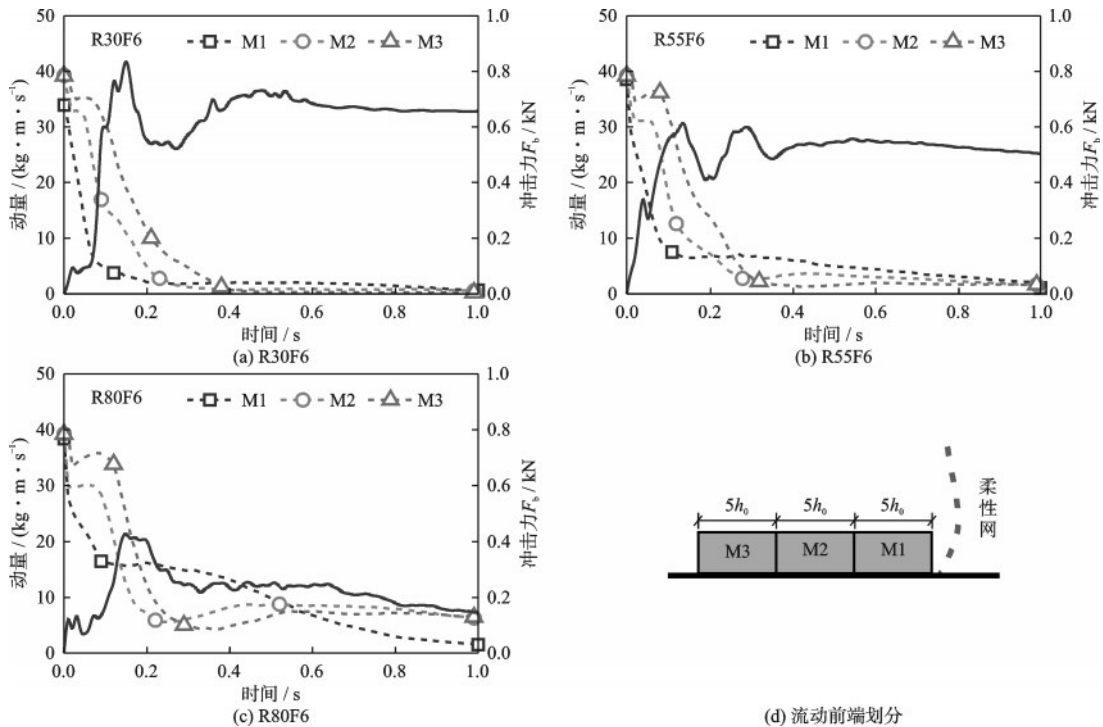


图 12 不同网径条件下碎屑流冲击力时程曲线

Fig.12 Time history curves of impact force of debris flows under different mesh size

特征,图 12 中绘制了 Froude 数等于 6 时不同网径尺寸条件下冲击力和碎屑流前端各部分的动量时程演化曲线,其中冲击合力  $F_0$  为所有碎屑流与柔性网颗粒的法向接触力之和。结果表明:碎屑流在接触柔性网后约 0.18 s 时冲击力达到最大值,在此过程中, M1~M3 部分碎屑流动量平均降幅分别为 75%、74%、52%。这表明碎屑流作用在柔性网上的冲击动荷载主要来源于前端约  $10h_0$  长度范围内碎屑流动量变化。当网径尺寸从 30 mm 增加到 80 mm 时, M1 部分碎屑流动量衰减幅度从 92% 降低到 55%,而对 M2 及其之后的流动体动量的降低幅度并不明显。说明网径尺寸主要影响碎屑流前端约  $5h_0$  长度范围内碎屑流的动量传递过程,原因是堆积在网后的死区颗粒大幅度降低了后续碎屑流从柔性网中通过的概率,且其能量主要通过颗粒间的摩擦碰撞的方式被耗散。

结合图 12 和图 9(b)、(c),随着网径尺寸从 30 mm 增加到 80 mm,峰值冲击力时刻死区的堆积高度  $h_{dz}$  和堆积质量  $M_{dz}$  分别降低了约 63% 和 86%,残余堆积状态 ( $t=1$  s) 下的  $h_{dz}$  和  $M_{dz}$  分别降低了 20% 和 37%。相应的,网径比的增加使得峰值冲击力和残余冲击分别降低了约 49% 和 78%。综上,在一定范围内通过扩大网径尺寸的方式增加网径比,有助于降低碎屑流作用在柔性网上的峰值冲击

力和堆积静荷载。

## 4.2 冲击力分量和荷载分布

如图 13 所示,为提取并计算流动层颗粒引起的动力分量  $F_{dyn}$  和死区引起的静力分量  $F_{sta}$  的归一化值(用峰值冲击力归一化)时程曲线。冲击合力  $F_0$  呈现出波动和多峰特征,导致此现象的原因有二:(1)颗粒间的力链具有高度波动性的特征;(2)受死区扩展影响,  $F_{sta}$  总体呈单调上升趋势,而  $F_{dyn}$  则在达到峰值后迅速下降。这在野外监测<sup>[24]</sup>、大尺度模型试验<sup>[25]</sup>中均有观测到,表明通过 DEM 模拟可较好的反映实际滑坡碎屑流的动态冲击特征。

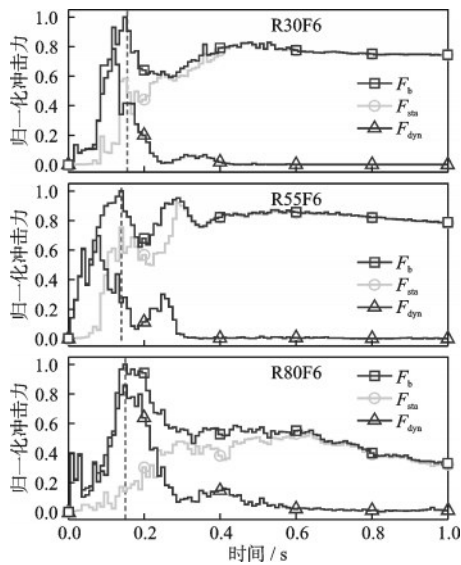


图 13 不同网径尺寸条件下冲击力分量时程演化

Fig.13 Time history evolution of impact force components under different mesh sizes

随着网径尺寸由 30 mm 增加至 80 mm,峰值冲击力时刻  $F_{sta}$  的占比由 79% 降低至 15%,而  $F_{dyn}$  由 21% 增加至 85%,表明随着相对网径比的增加,峰值冲击力中来自死区的作用力降低,流动层颗粒造成的动荷载增加且逐渐占主导作用。这是由于网径尺寸的增加改变了峰值冲击力时刻的碎屑流的冲击机制(图 14),即网径尺寸越大,在网后形成稳定死区的时间也越长,峰值冲击力时刻的死区在堆积高度和堆积质量上也更小。

在高度方向从基底  $0 \sim 1 h_0$  开始,每隔  $h_0$  计算该范围内柔性网上的冲击力,得到不同网径尺寸条件下峰值冲击力时刻冲击力在高度方向上的分布如图 15 所示。由于柔性网的大变形特征,冲击力在高度方向上整体呈非线性分布。在网径尺寸为

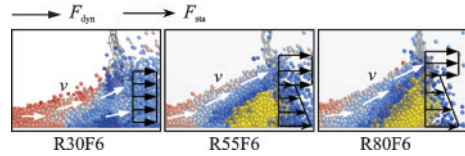


图 14 峰值冲击力时刻速度云图和荷载组成

Fig.14 Velocity cloud map and load composition at peak impact force moment

30 mm 时,距基底  $1 \sim 2 h_0$  范围内的网面承受的冲击荷载的比例最大。随着网径尺寸的增加,网面承载比例最大部位向基底  $0 \sim 1 h_0$  范围内转移。这表明在冲击动荷载和静荷载的大小和作用范围发生改变后,冲击合力的作用点随之发生变化,从而改变了冲击力在高度方向上的分布特征。因此,在应用大网径尺寸的柔性网防护碎屑流时,为节省建设成本,在高度方向上可分区优化设计网环的规格和强度。

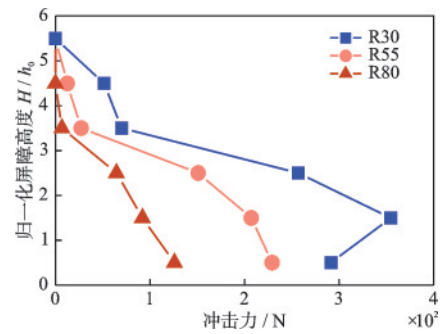


图 15 网径尺寸对峰值冲击力时刻荷载分布影响

Fig.15 Effect of mesh size on load distribution at peak impact force moment

除环形网片外,支撑索也是重要承载结构。如图 16 所示,比较了峰值冲击力时刻作用在环形网面的冲击力  $F_{r,r}$  和作用在所有支撑索上的冲击力  $F_{r,c}$  的相对大小。由于环形网片与碎屑流的接触面积远大于碎屑流与支撑索的接触面积,直接作用在支撑索上的冲击力  $F_{r,c}$  约为直接作用在柔性网上冲击力  $F_{r,r}$  的 0.09 ~ 0.41 倍。另外,随着网径尺寸的增加,网环的承受的冲击力的比重降低,相应的支撑索承受的冲击力的比重增加。这意味着当扩大网径尺寸时,应适当提高支撑索的强度设计比重,以保证柔性网结构的稳定性。

## 4.3 峰值冲击力与模型验证

峰值冲击力是保证柔性网安全运行的关键设计指标,在提取所有工况下碎屑流峰值冲击力后,

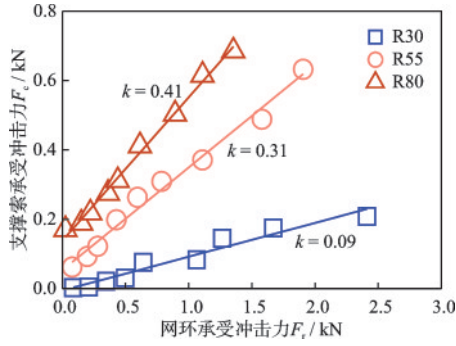


图16 峰值冲击力时刻作用在支撑索和网环上冲击力对比  
Fig.16 Comparison of impact force on support cables and mesh rings at peak impact force moment

使用  $\rho_0 h_0 v_0^2 w$  进行归一化处理,得到冲击系数  $\alpha$  与 Froude 数和相对网径比关系如图 17 所示。结果表明:在不同网径尺寸条件下,冲击系数  $\alpha$  均随着 Froude 数的增加呈负幂函数形式 ( $\alpha = aF_r^{-b}$ ) 的递减趋势。在来流 Froude 数小于 4 时,网径尺寸对冲击系数  $\alpha$  的影响并不显著,主要受来流 Froude 数控制。当 Froude 数大于 4 后,冲击系数  $\alpha$  随着网径尺寸的增加而降低,而 Froude 数的影响则较小。因此,在应用柔性网防治碎屑流时,只有在来流 Froude 数大于临界值后(本研究中约等于 4)时,调节网径比的大小才会有效降低峰值冲击力。

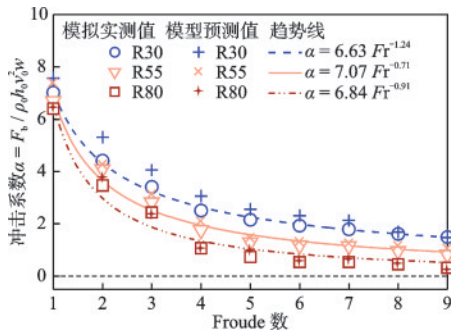


图17 峰值冲击力与分析模型验证  
Fig.17 Peak impact force and analysis model verification

为验证本研究提出考虑柔性网透过性的冲击力模型的正确性和适用性,将数值模拟计算值与模型预测值进行对比和分析。在冲击过程结束后,由于冲击合力  $F_b$  完全由死区引起的静态力分量  $F_{sta}$  贡献,将此时刻的残余冲击力代入到式(3)中计算得到摩擦系数  $\mu_{dz}$  的取值。尽管在节 4.1 中可基于动量损失大致估算  $L$  的取值范围,但仍然难以确定其具体值。假设在 Froude 数相等时,不同网径尺寸条件下与柔性网相互作用的有效流动体长度相等。由于在网径尺寸为 30 mm 时,网面透过能力差。因此

忽略该条件下网面透过性对冲击力的影响,即  $m_1 v_1 = 0$ 。在此基础上,使用峰值冲击力减去死区贡献的静力分量后,将动力分量带入到式(6)中反算得到不同 Froude 数条件下有效流动体长度  $L$  的取值。从柔性网中透过颗粒的动量  $m_1 v_1$  则通过  $\sum_0^{\Delta t} m_1(t) v_1(t)$  计算得到。

综上,将  $\mu_{dz}$ 、 $L$  和  $m_1 v_1$  代入到式(6)中得到网径尺寸为 55、80 mm 条件下峰值冲击、力的预测值如图 17 所示。由图可知,提出的分析模型预测值与 DEM 数值模拟结果的趋势一致且相对误差在  $\pm 15\%$  以内,不仅验证了本研究提出分析模型的正确性,更反映了网径尺寸变化引起网面透过性的改变与碎屑流冲击力变化的关联性。

实际上,滑坡碎屑流颗粒组成复杂多变,通常由多粒径、不均匀形状和不同类型材料的混合物构成。由于粒径、大小和密度的差异,颗粒分选效显著影响碎屑流前端的粒径分布<sup>[26-27]</sup>。尽管本文建立的分析模型基于单分散颗粒系统,但峰值冲击力大小随柔性网面对碎屑流前端颗粒的透过性增加而降低这一结论,同样适用于多元、多粒径的混合颗粒流。对于粒径组成更为复杂的滑坡碎屑流,在明确其流动前端颗粒特征粒径的基础上,还需进一步研究柔性网对具有不同分选程度、非均匀形状颗粒组成的碎屑流前端的透过性,并基于本研究提出的分析模型,推导建立更加精细化的模型。此外,野外调查统计结果<sup>[28-29]</sup>显示,在滑坡碎屑流前端夹杂的大块径的滚石的冲击下,极易造成柔性防护网的局部破损。对于此种情形,在应用本文提出的冲击合力计算模型为柔性网系统整体的刚度和强度设计提供理论依据的同时,还需要应用防治崩塌落石的设计标准,核算大块滚石的冲击位置和冲击力的大小,避免局部损坏导致整个被动防护网的丧失防护能力。

## 5 结 论

基于离散元法,研究了柔性网的透过性对碎屑流冲击动力学特征的影响机制,主要结论如下:

(1) 相对网径比为 2.0 ~ 5.3,柔性网对碎屑流前端的透过性随网径比的增加而增加,且来流 Froude 数越大,效果越显著。

(2) 随着柔性网透过性的增加,死区的堆积高度和堆积质量降低,导致死区引起的静态作用力力



分量的减少;流动前端传递传递到柔性网上的动量降低,导致了动态冲击力的降低。在Froude数小于4时,网径比对碎屑流的冲爬高度和峰值冲击合力的影响较小;当Froude数大于4后,增大网径比有助于降低碎屑流的峰值冲击力。

(3)建立的透过性冲击力模型可应用于分析和估算碎屑流对不同网径柔性网的峰值冲击力。但模型对有效流动体的取值依赖于结果反演,其定量划分依据和计算方法有待进一步研究。

(4)在以耗散碎屑流动量为目标的被动柔性防护网工程中,优化环形柔性网的网径尺寸,可有效降低冲击力和预防溢流,并减少维护需求和成本。同时,为节约建造成本,分区优化设计应重点关注基底柔性网环和支撑索的受力特性及结构强度。

### 参考文献:

- [1] Stoffel M, Trappmann D G, Coullie M I, et al. Rockfall from an increasingly unstable mountain slope driven by climate warming[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(3): 249-254.
- [2] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2612-2628.  
Xu Q, Li W L, Dong X J, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2612-2628. (in Chinese)
- [3] Zhao L, Zhang L, Yu Z, et al. A case study on the energy capacity of a flexible rockfall barrier in resisting landslide debris[J]. *Forests*, 2022, 13(9): 1384.
- [4] 肖思友, 覃超, 李殿鑫, 等. 碎屑流被动柔性防护网的结构与安装特征研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(增2): 1051-1060.  
Xiao S Y, Qin C, Liu D X, et al. Structure and illustration of flexible barriers against a granular flow[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(Sup2): 1051-1060. (in Chinese)
- [5] 肖思友, 苏立君, 姜元俊, 等. 柔性网结构对碎屑流冲击力学特征的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(12): 2473-2484.  
Xiao S Y, Su L J, Jiang Y J, et al. Investigation on impact characteristics of granular flow against different structures of flexible barriers[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2473-2484. (in Chinese)
- [6] Choi C E, Goodwin G R. Interaction between granular flows and flexible obstacles: A grain-scale investigation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 128: 103800.
- [7] Song D R, Ng C W W, Choi C E, et al. Influence of debris flow solid fraction on rigid barrier impact[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(10): 1421-1434.
- [8] Song D R, Zhou G G D, Choi C E, et al. Debris flow impact on flexible barrier: effects of debris-barrier stiffness and flow aspect ratio[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(7): 1629-1645.
- [9] Liu C, Yu Z, Zhao S. Quantifying the impact of a debris avalanche against a flexible barrier by coupled DEM-FEM analyses[J]. *Landslides*, 2020, 17(1): 33-47.
- [10] Geobruugg. Protection systems against natural hazards [EB/OL]. (2012-06-06) [2025-01-21]. <https://www.youtube.com/watch?v=LUUeBRZ-IOg>.
- [11] 余志祥, 骆泓锦, 张丽君, 等. 考虑透水效应的泥石流柔性防护网耦合分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(8): 1695-1702.  
Yu Z X, Luo H J, Zhang L J, et al. Coupling analysis method for flexible debris flow barriers considering water blocking and permeability effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(8): 1695-1702. (in Chinese)
- [12] Wendeler C, Volkwein A. Laboratory tests for the optimization of mesh size for flexible debris-flow barriers[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(12): 2597-2604.
- [13] Tan D, Feng W, Yin J, et al. Numerical study of retention efficiency of a flexible barrier in mitigating granular flow comparing with large-scale physical modeling test data[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(2): 433-448.
- [14] Tan D Y, Yin J H, Feng W Q, et al. New simple method for measuring impact force on a flexible barrier from rockfall and debris flow based on large-scale flume tests[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105881.
- [15] 肖思友, 苏立君, 姜元俊, 等. 坡度对碎屑流冲击立式拦挡墙力学特征的影响[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4341-4351, 4360.  
Xiao S Y, Su L J, Jiang Y J, et al. Influence of slope on the mechanical properties of dry granular flow impacting on the vertical retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4341-4351, 4360. (in Chinese)
- [16] Jiang Y J, Towhata I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining

- wall[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(4): 713-729.
- [17] Shenandoah, Debris Flow Barrier[EB/OL].[2024-10-23]. <https://www.geovert.com/gedp-past-projects/shenandoah/debris-flow-barrier>.
- [18] Wendeler C. Debris-flow protection systems for mountain torrents: basics principles for planning and calculation of flexible barriers[M]. WSL Ber. 44: 279, 2016.
- [19] Goodwin S R, Choi C E. Slit structures: Fundamental mechanisms of mechanical trapping of granular flows [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 119: 103376.
- [20] Choi C E, Ng C W W, Au-Yeung S C H, et al. Froude characteristics of both dense granular and water flows in flume modelling[J]. *Landslides*, 2015, 12(6): 1197-1206.
- [21] Faug T. Depth-averaged analytic solutions for free-surface granular flows impacting rigid walls down inclines[J]. *Physical Review E*, 2015, 92(6): 062310.
- [22] 高杨, 殷跃平, 李滨, 等. 考虑颗粒状态转化的高位远程滑坡数值模拟方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(7): 1623-1637.  
Gao Y, Yin Y P, Li B, et al. Numerical simulation method of high-position and long runout landslide under granular state transformation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42 (7) : 1623-1637.(in Chinese)
- [23] Savage S B, Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 199(1): 177-215.
- [24] Hu K H, Wei F Q, Li Y. Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at Ji-angjia Ravine, China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(9): 1268-1278.
- [25] Tan D Y, Yin J H, Feng W Q, et al. Large-scale physical modelling study of a flexible barrier under the impact of granular flows [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(10): 2625-2640.
- [26] Zhu Y, Jiang Y, Liu Y, et al. Material characteristic-controlled particle segregation in rock-ice avalanche [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 171: 106367.
- [27] Gray J M N T. Particle segregation in dense granular flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2018, 50 (1): 407-433.
- [28] 柳春. 柔性防护结构坡面地质灾害作用的离散化分析理论与方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
Liu C. Theory and method of discrete analysis for flexible protective structure against geological hazard on shallow slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.(in Chinese)
- [29] 胡芹龙. 川西地区地质灾害防治工程效果评价研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.  
Hu Q L. study on evaluation of engineering effect of geological disaster prevention and control in western sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.(in Chinese)

(本文编辑:张艺)