DOI：10.16285/j.rsm.2020.0311

泥石流冲击弧形拦挡坝动力响应研究

王东坡，张小梅

（成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059）

摘 要：泥石流冲击过程中，坝基位置处承受了较大冲击力，易引起该位置出现应力集中而导致局部冲击破坏。为此，将竖向拦挡坝结构优化为弧形拦挡坝，并基于动量及能量守恒开展泥石流冲击弧形拦挡坝理论计算研究，推导泥石流对弧形拦挡坝的冲击力及爬升高度计算公式。为验证理论公式的正确性，进一步开展泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验。研究结果表明：物理模型试验结果与所推导的理论公式计算结果具有较高的拟合度，该理论公式可适用于泥石流对弧形拦挡坝的冲击计算；泥石流流速、冲击力、爬升高度与泥石流沟道纵坡坡度呈正相关关系；冲击力及爬升高度主要受弗洛德数 Fr、泥石流沟道纵坡坡度α、拦挡坝弧形半径 R 控制，并与 Fr 呈二次方正相关，与泥石流沟道纵坡坡度α的余弦值成反比；与竖向型拦挡坝结构相比，弧形拦挡坝结构在爬升高度上无显著影响，然而可较大程度降低泥石流对坝体的法向冲击力，局部结构增强也使得坝体结构强度得到提升。该研究可为泥石流拦挡坝工程的结构设计提供理论及技术支持。

关 键 词：泥石流；弧形拦挡坝；冲击力；爬升高度

中图分类号：TU42 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2020) 12－3851－11

Study on dynamic response of debris flow impact arc-shaped dam

WANG Dong-po, ZHANG Xiao-mei

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Dam foundation is subjected to a larger impact force when debris flow runs up, causing stress concentration and local impact failure. To address this problem, in this study the vertical structures are optimized into arc-shaped dams. Based on the principle of momentum and energy conservation, the theoretical calculations of the impact process of debris flow and arc-shaped dam are carried out, and the formulas of impact force and maximum run-up height of debris flow are deduced. The theoretical formulas are verified through a series of physical model tests of debris flow impact arc-shaped dam. The results show that the results of the physical model are highly consistent with those of the theoretical calculations, indicating that the proposed theoretical formulas are applicable in the calculation of the impact of debris flow on arc-shaped dam. The debris velocity, impact force and the maximum run-up height are proportional to the flume slope of debris flow. The impact force and the maximum run-up height are mainly controlled by Froude number(Fr), flume slope(α), and arc-shaped radius(R). Both the impact force and the maximum run-up height have quadratic relationships with the Froude number, and are inversely proportional to the cosine of the flume slope. Compared with the rigid vertical structures, the arc-shaped dams have no signicicant influence on the maximum run-up height, but it can reduce the normal impact force on the dam considerably, and the structure strength can also be enhanced by the strengthening of local structure. This study provides a theoretical and technical support for the dam structure design.

Keywords: debris flow; arc-shaped dam; impact force; maximum run-up height

1 引 言

汶川强烈地震导致山体破碎，诱发大量崩塌、滑坡灾害，崩滑体堆积于坡面、沟道中，为震后泥石流形成提供了巨量松散固体物源，使得泥石流起动临界雨量大幅降低，爆发频率急剧增加，成为震

收稿日期：2020-03-18 修回日期：2020-07-11
基金项目：国家自然科学基金（No.41877266，No.41790433）；四川省杰出青年科技人才项目（No.2020JDJQ0044）；地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题（SKLGP2019Z013，SKLGP2019K011）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41877266, 41790433), the Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Sichuan Province(2020JDJQ0044) and the State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Independent Research Project(SKLGP2019Z013, SKLGP2019K011).
第一作者简介：王东坡，男，1984 年生，博士，博士后，教授，博士生导师，主要从事地质灾害冲击动力学方面的研究。E-mail: wangdongpo@cdut.edu.cn

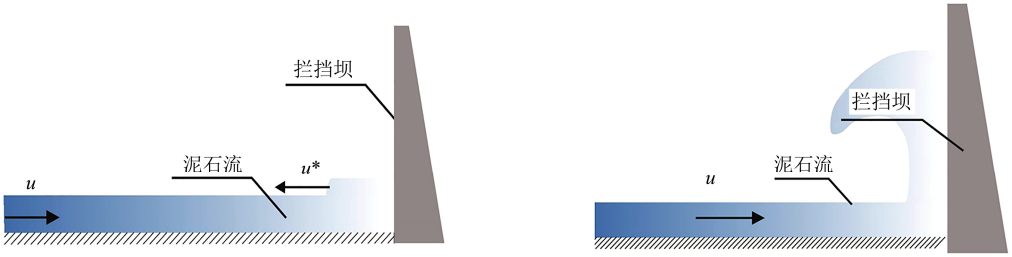
后主要的次生灾害类型[1]。为保障人民群众生命财产及基础设施安全，震后 10 年间，国家在地震灾区开展了大量泥石流拦挡坝工程建设。然而，由于地震作用使得泥石流成灾、环境剧变，震后即时修建的泥石流防治工程在多期次、大规模泥石流作用下频繁失效，有些防治工程反复重建[2-5]。通过对泥石流防治工程失效案例的现场调查发现，拦挡坝结构中受泥石流及其大块石作用导致拦挡坝局部冲击破坏的比例高达 50%以上[6-7]。其中重要原因之一是，拦挡坝工程的迎冲面常设计为竖向结构，未充分考虑泥石流与拦挡坝冲击时空分布及泥石流运行轨迹，仅把泥石流与拦挡坝冲击过程看作瞬间冲击行为[8-11]。

前人研究多集中在泥石流对竖向拦挡坝冲击动力响应方面，何思明等[12-13]以弹塑性理论为基础，考虑拦挡坝等防治结构弹塑性特性，提出了泥石流冲击力计算方法。陈洪凯等[14-16]通过研究泥石流固相粒径、冲击压痕揭示了泥石流脉动荷载分布特性以及冲击力大小分布。李俊杰[17-18]、王秀丽[19]等开展了泥石流冲击荷载下拦挡坝动力响应分析。王东坡等[20]通过物理模型试验研究了泥石流流速、流深以及流体特征参数与泥石流冲击压力的相关性。Vagnon 等[21]借助泥石流水槽试验提出考虑泥石流对刚性不排水挡墙影响的计算公式，用于估算泥石流冲击防护结构的冲击力。Armanini 等[22]通过开展泥石流物理模型试验，研究泥石流对刚性竖向拦挡坝结构产生的冲击力及泥石流爬升高度的时程变化，得出泥石流冲击力与爬升高度的理论公式。Koo[23]、Kwan[24]等在计算泥石流对障碍物产生的冲击力时，开发了动量通量衰减新模型。Wendeler[25]、Kwan[26]修正了泥石流多阶段水动力模型，该模型认为泥石流与拦挡坝相互作用的过程可以分为 2 个阶段：第 1 阶段为泥石流冲击拦挡坝并堆积于拦挡坝坝基位置；第 2 阶段为泥石流越过堆积物产生冲击，直至爬升高度达到峰值，其中泥石流的峰值冲击力位于第 1 阶段。

本文将拦挡坝由竖向结构优化为弧形结构，引导泥石流从动能向势能转换，以期降低泥石流冲击拦挡坝结构的瞬间法向冲击力峰值，从而达到提升拦挡坝整体抗冲击能力的目的。为此，基于能量、动量、质量守恒定律，研究泥石流流速、流深、泥石流沟道纵坡坡度等参数与泥石流冲击力及爬升高度间的相关性，获得与泥石流冲击力及爬升高度相关的无量纲参数，再以物理模型试验对泥石流冲击力及爬升高度理论公式进行验证，进而为弧形拦挡坝工程设计提供理论支撑。

2 泥石流冲击拦挡坝的模式分析

针对竖向拦挡坝结构，Armanini[27-29]通过大量水槽试验，发现泥石流与拦挡坝间的冲击过程常呈现两种模式：一种是泥石流冲击拦挡坝后形成反射弧向上游回流，另一种是沿拦挡坝进行爬升。Armanini 认为：两种模式主要取决于弗洛德数 Fr，当 Fr<3 或 Fr<3$(\cos\alpha)^{0.5}$ 时（α 为泥石流沟道纵坡坡度）泥石流冲击拦挡坝后形成反射弧向上游回流（如图 1(a)所示）；当 Fr>3 或 Fr>3$(\cos\alpha)^{0.5}$ 时泥石流冲击拦挡坝后，在惯性作用下会继续沿拦挡坝向上爬升（如图 1(b)所示）。



(a) 反射向上游回流（ $Fr<3$ ）或（ $Fr<3\sqrt{\cos\alpha}$ ） (b) 爬升喷射（ $Fr>3$ ）或（ $Fr>3\sqrt{\cos\alpha}$ ）

图 1 泥石流与拦挡坝冲击的两种模式

Fig.1 Two impact types of debris flow on rigid barrier

Armanini[22]、Koo[23]等通过水槽试验开展了两种模式下泥石流冲击力、爬升高度与无量纲参数（弗洛德数、泥石流沟道纵坡坡度）的相关关系，并得出如下结论：

2.1 泥石流无量纲冲击力 p

为了将泥石流冲击过程中冲击力与 Fr 等无量纲参数建立相关关系，前人[22]通过一系列物理模型试验将所获得的泥石流冲击竖向拦挡坝冲击力与静

水压力值（$0.5\rho gh^2\cos\alpha$）相比，实现对泥石流冲击力的无量纲化。

$$p=\begin{cases}\left(1+1.51\left(\dfrac{Fr}{\sqrt{\cos\alpha}}\right)^{1.2}\right)^{5/3} & (Fr<3 \text{ 或 } Fr<3\sqrt{\cos\alpha})\\ 1+2\dfrac{Fr^2}{\cos\alpha} & (Fr>3 \text{ 或 } Fr>3\sqrt{\cos\alpha})\end{cases} \tag{1}$$

式中：p 为竖向型拦挡坝无量纲冲击力。

2.2　爬升高度$(h_g)_{\max}$

$$\frac{(h_g)_{\max}}{h}=1+\frac{1}{2\cos\alpha}Fr^2 \tag{2}$$

式中：$(h_g)_{\max}$ 为爬升高度（m）；h 为泥石流流深（m）。

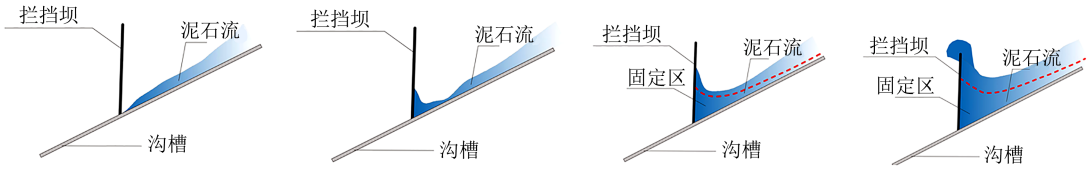
上述研究是基于泥石流冲击竖向拦挡坝提出，而物理模型试验和实践工程均表明，在泥石流冲击拦挡坝时，泥石流冲击竖向拦挡坝坝基局部位置处极易出现损坏，坝体结构亟需进一步得到优化。为此，将竖向拦挡坝优化为弧形结构，相关理论计算见下一章节。

3　泥石流冲击弧形拦挡坝的理论计算

3.1　设计依据

泥石流与拦挡坝间的冲击运动过程见图 2。

在泥石流与竖向拦挡坝冲击过程中，主要分为 3 个阶段：① 泥石流对拦挡坝瞬间冲击，此时坝体所受冲击力最大；② 坝基位置处形成固定区，该区域在后续泥石流运动过程中不参与运动；③ 后续泥石流沿弧形面向上爬升或翻坝。



(a) 冲击前　(b) 冲击过程　(c) 爬升过程　(d) 翻坝过程

图 2　泥石流与拦挡坝间冲击运动过程

Fig.2　Impact process of debris flow against rigid barrier

根据对泥石流冲击拦挡坝物理模型试验和现场调查发现，该瞬间冲击力常导致拦挡坝结构局部损坏。若通过将竖向拦挡坝结构优化为弧形，该优化设计可增强坝基位置处的局部强度，此外在泥石流运动过程中，弧形部分可更好地引导泥石流动能转化为势能和摩擦热能，从而达到降低泥石流冲击拦挡坝能量、减少拦挡坝失效风险以及有效防止泥石流致灾的目的。

3.2　理论计算

图 3 为泥石流冲击弧形拦挡坝的计算简图，假设泥石流以流深 h，流速 u_A 进入弧形段，计算时在弧 AB 段取一微元 dl 作为控制单元进行分析。在进行泥石流与弧形拦挡坝理论计算过程中，作出如下假设：

（1）泥石流为均匀流体，固液两相流动速度相同，且不发生分离离析现象。

（2）在泥石流与拦挡坝接触过程中每一个横剖面上速度分布均匀。

（3）在弧形拦挡坝上取每一微圆弧段进行分析时，假定其压力大小相同。

（4）在泥石流冲击拦挡坝的过程中，认为速度与弧形拦挡坝相切。

（5）计算过程忽略河床剪切应力并不考虑摩擦的影响。

（6）泥石流运动过程中，温度保持恒定，不考虑热量损耗。

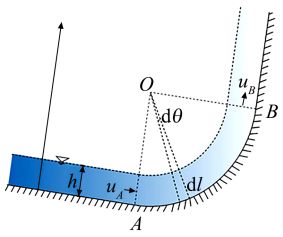


图 3　计算简图

Fig.3　Computing model

根据能量、质量、动量守恒定律，建立泥石流冲击弧形拦挡坝过程中 Fr、α 与冲击力、爬升高度的计算公式。

3.2.1　冲击力计算公式

运动过程中，动量守恒方程可描述为

$$\iiint_V\frac{\partial}{\partial t}\rho\boldsymbol{u}\mathrm{d}V+\int_\Sigma(\rho\boldsymbol{u})\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\mathrm{d}\Sigma=\iiint_V\rho\boldsymbol{f}\mathrm{d}V+\int_\Sigma\boldsymbol{F}\mathrm{d}\Sigma \tag{3}$$

式中：ρ 为泥石流密度(kg/m^3)；$\boldsymbol{u}$ 为泥石流流速(m/s)；t 为流动时间（s）；V 为泥石流在圆弧段的计算控制体积（m^3）；$\boldsymbol{f}$ 为体力（N）；$\boldsymbol{F}$ 为面力（N）；$\boldsymbol{\Sigma}$ 为泥石流在圆弧段的计算控制面积（m^2）；$\boldsymbol{n}$ 为控制面的法向向量。

质量守恒方程描述为

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t}\rho \mathrm{d}V = \int_\Sigma \rho \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\mathrm{d}\Sigma \tag{4}$$

在泥石流运动过程中，假定拦挡坝弧形段承受了泥石流对拦挡坝的瞬间冲击力。对控制单元进行动量守恒分析，则有

$$\frac{1}{2}\rho g h^2\cos\alpha + \rho u_A^2 \mathrm{h} = \int_l p\sin\theta \mathrm{d}l = \int_{\frac{3}{2}\pi}^{2\pi} p\sin\theta R\mathrm{d}\theta \tag{5}$$

式中：g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2；α为泥石流沟道纵坡坡度（º）；θ 为所取微元段与竖向方向的夹角（º）；u_A 为泥石流运动到 A 点（即沿流动方向由沟槽直线段过渡到圆弧段的接触点）的速度（m/s）；R 为弧形拦挡坝圆弧段的半径（m）。

当泥石流运动到图3中 B 点及 B 点以上阶段时，得到拦挡坝承受的最大冲击力 p 为

$$p = \frac{\frac{1}{2}\rho g h^2\cos\alpha + \rho u_A^2 h}{R} \tag{6}$$

为便于与前人所研究的冲击力公式进行对比分析，对最大冲击力值进行无量纲化处理，将所得到的冲击力公式与静水压力相除得

$$p' = \frac{1}{R} + \frac{2}{R}\frac{Fr^2}{\cos\alpha} \tag{7}$$

式中：p'为弧形拦挡坝无量纲冲击力（N）。

3.2.2 泥石流爬升高度计算公式

能量守恒方程可描述为

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho e_\mathrm{t})\mathrm{d}V + \int_\Sigma (\rho e_\mathrm{t})\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}\mathrm{d}\Sigma = \int_\Sigma \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{u}\Sigma - \frac{\partial H}{\partial t} \tag{8}$$

式中：e_t 为单位质量流体的能量（m^{-2} • s^{-2}）；H 为控制体的热量变化（kg • m^2/s^3）；等式左边第 1 项为随时间变化的控制体能量；等式左边第 2 项为控制面上的能量通量；等式右边第 1 项为面力所做的功；等式右边第 2 项为单位时间内周围环境提供给控制体的能量，在计算中假设温度恒定不予考虑热量的损耗。

单位质量流体的能量 e_t 为单位质量动能 e_k 与势能 e_p 之和，即

$$e_\mathrm{t} = e_\mathrm{k} + e_\mathrm{p} = \frac{1}{2}u^2 + gR\cos\alpha(1-\cos\theta) \tag{9}$$

将 e_t 代入动能方程等式左边，则随时间变化的控制体能量可描述为

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho e_\mathrm{t})\mathrm{d}V = \rho\left[\frac{1}{2}u^2 + gR\cos\alpha(1-\cos\theta)\right]\frac{hR\partial\theta}{\partial t} = \rho h\left[\frac{1}{2}u^2 + gR\cos\alpha(1-\cos\theta)\right]u \tag{10}$$

控制面上的能量通量可描述为

$$\int(\rho e_\mathrm{t})\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n}\mathrm{d}\Sigma = \rho\left[\frac{1}{2}u^2 + gR\cos\alpha(1-\cos\theta)\right]_A(-u)h \tag{11}$$

控制体上面力所做的功为

$$\int \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{u}\,\mathrm{d}\Sigma = -s(-u)h \tag{12}$$

式中：s 为控制面上的压力（N）。

将式（10）～（12）代入式（8），可得

$$\rho\left[\frac{1}{2}u^2 + gR\cos\alpha(1-\cos\theta)\right]_B u - \rho\left[\frac{1}{2}u^2 + gR\cos\alpha(1-\cos\theta)\right]_A(-u)h - s(-u)h = 0 \tag{13}$$

当泥石流运动到其最大爬升高度时，则泥石流速度为 0，得

$$(h_g)_{\max}\cos\alpha = R\cos\alpha + \frac{s}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} \tag{14}$$

在自由表面，$s=0$，则：

$$(h_g)_{\max}\cos\alpha = R\cos\alpha + \frac{u^2}{2g} \tag{15}$$

获得无量纲泥石流爬升高度：

$$\frac{(h_g)_{\max}}{h} = \frac{R}{h} + \frac{u^2}{2gh\cos\alpha} = \frac{R}{h} + \frac{Fr^2}{2\cos\alpha} \tag{16}$$

上述研究通过理论推导出泥石流冲击弧形拦挡坝无量纲冲击力计算公式（式（7））及泥石流爬升高度公式（式（16））。为验证理论公式的正确性，进一步开展泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验。

4　泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验

开展不同粒径组、不同纵坡坡度下泥石流对拦挡坝冲击物理模型试验，从而探索泥石流冲击拦挡坝过程的变化特征和规律。试验目的一是为了获得泥石流与弧形拦挡坝冲击力、爬升高度、流速等与变量参数（如沟槽坡度、泥石流颗粒粒径组）之间的相关关系，二是通过物理模型试验对第 3 节中所推导获得的理论公式进行验证。

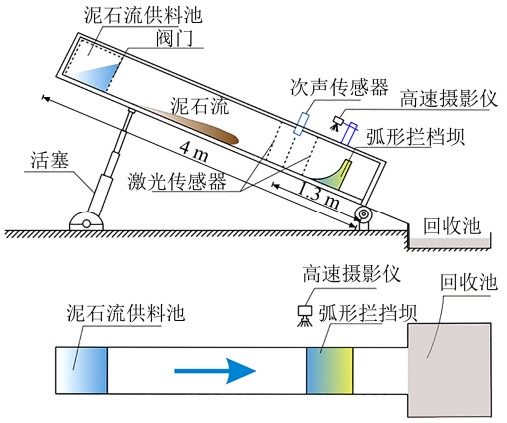
在泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验中，测量泥石流到达坝前的流速 v、流深 h、冲击力 p、爬升高度$(h_g)_{\max}$ 等参数，以弗洛德数、泥石流沟道纵坡坡度为变量分析泥石流对弧形拦挡坝的冲击响应，研究其对拦挡坝的冲击力以及泥石流的爬升高度的影响。

4.1　试验装置

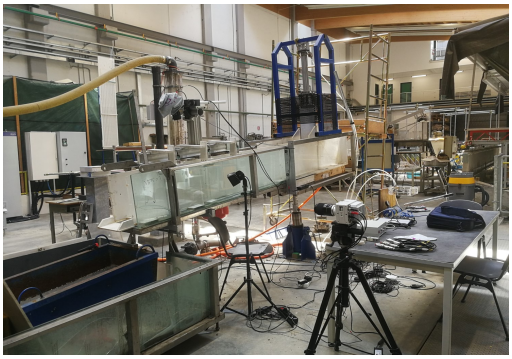
所开展的泥石流物理模型试验系统分为：物源区、流通区和堆积区。分别由供料池、有机玻璃水槽、弧形拦挡坝、泥石流收集回收装置及传感器、高速摄像机等设备组成；该系统可模拟泥石流从启动、运动、冲击拦挡坝的全过程，试验装置如图 4 所示。水槽顶部为供料池，为试验提供泥石流浆体。钢架水槽为矩形断面，两侧壁安装钢化玻璃，便于对泥石流与拦挡坝间的冲击过程进行观察。水槽尺寸长 4 m，宽 0.25 m，坡度调节范围为 0°～39°。弧形拦挡坝模型安装在水槽的末端，弧形拦挡坝上安装有压力传感器（如图 5(c)所示），便于测量泥石流与拦挡坝间冲击力。在水槽的下方设置回收池，方便循环利用泥石流颗粒材料。

4.2　测试系统

测量系统主要由两部分组成，分别为测试传感系统和高速摄像系统。其中测试传感系统包括次声传感器和动态压力传感器。3 个次声传感器用于测量泥石流到达坝前的流深，4 个动态压力传感器记录泥石流冲击拦挡坝瞬间所产生的泥石流冲击压力；高速摄像系统由两台高速摄影仪组成，一台放于水槽侧方用于记录泥石流冲击拦挡坝的整个过程，另一台安置于水槽正上方用于测算泥石流到达拦挡坝前的流速。上述所有仪器设备均由数据采集仪同步触发。试验中具体的仪器及参数见表 1。动态压力传感器在拦挡坝上的布置见图 5。



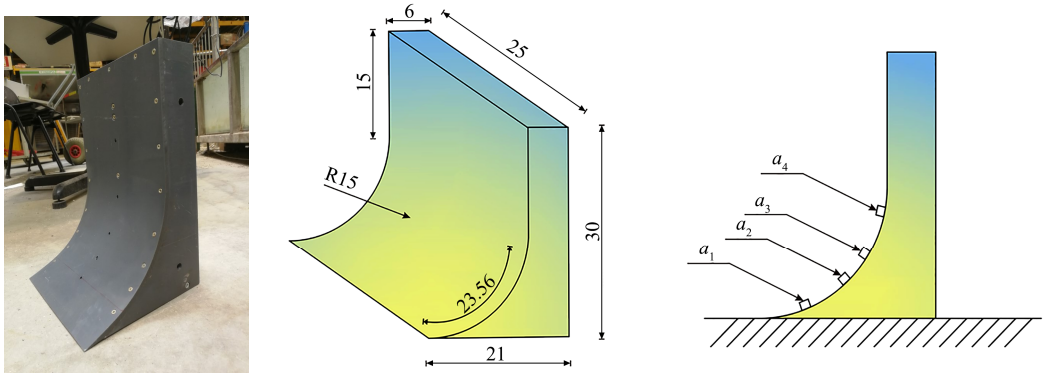
(a) 泥石流冲击弧形拦挡坝试验简化图



(b) 泥石流冲击弧形拦挡坝现场图

图 4　泥石流冲击弧形拦挡坝试验装置图

Fig.4　Schematic illustration of debris flow impacting arc-shaped dam



(a) 弧形结构实际图　　(b) 弧形结构示意图　　(c) 弧形结构传感器示意图

图 5　弧形拦挡坝模型示意图

Fig.5　Schematic diagram of arc-shaped dam

表 1 物理模型试验所用仪器

Table 1 Test instruments of model experiment

试验仪器	品牌	数量	参数	备注
动态压力传感器	KELLER	4	测量范围：0～20 kPa；精度>0.2% FS；采样频率：1 000 Hz	记录弧形拦挡坝不同位置所受到的冲击压力
同步数据采集仪	DEWE	1	16 通道；输入电压：±10V，±500 mV	可实现高速摄影仪、传感器等设备采集的数据同步触发
高速摄影仪	Photron FASTCAM-1024PCI	2	分辨率：1 024 像素×1 024 像素；快门速度：1 000 帧/s	计算泥石流的速度；记录泥石流冲击拦挡坝运动过程
次声传感器	Pepperl-Fuchs	3	感应范围：30～500 mm；频率：380 kHz；响应延迟：21 ms；分辨率：评价范围[mm] / 4 000，但> 0.05 mm；精度：<0.1% FS	测量泥石流流深

4.3 试验材料及设计

弧形拦挡坝由两部分组成，竖向部分及弧形部分。竖向部分墙体尺寸为 6 cm×25 cm×30 cm，弧形部分半径为 15 cm，弧长设计为 23.56 cm（见图 5）。

为探索不同粒径组下泥石流对拦挡坝的冲击动力响应影响，试验过程采用以下 4 种泥石流固相粒径组，分别是粒径 0.3～0.6、0.6～1.0、1.0～2.0 cm、以及界于上述粒径之间的一组典型泥石流颗粒粒径组 0.3～2.0 cm，不同粒径组颗粒级配曲线如图 6 所示。

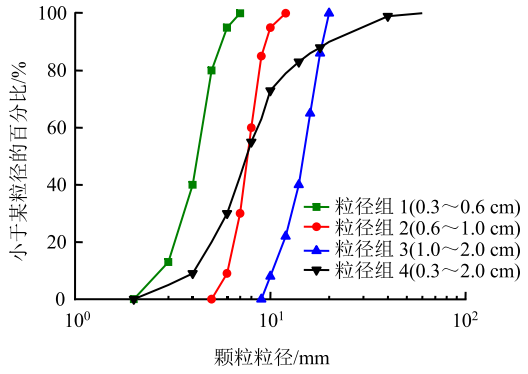


图 6 不同粒径组颗粒级配曲线

Fig.6 Grain gradation curves of debris flow

4.4 试验结果

试验共计开展 24 组，记录了泥石流冲击过程中相关参数（泥石流体积、密度、流速、爬升高度、冲击力等），设计了 4 种不同泥石流沟道纵坡坡度（15°、20°、25°、30°），并借助纯水流试验和 4 组泥石流冲击竖向型拦挡坝试验作为对比，试验结果如表 2 所示。

4.4.1 泥石流冲击拦挡坝运动过程分析

图 7 为采用高速摄影仪捕捉到的沟道纵坡坡度为 20° 时不同粒径组泥石流与拦挡坝冲击过程记录图。图中可清晰地观察到泥石流冲击、爬升、翻坝、回淤的全过程。图 7(a)～7(d)是泥石流对弧形坝的冲击过程，表现为：首先泥石流冲击到弧形结构部分，由于弧形段的增加，有效地引导了泥石流由法向方向朝向竖向方向的运动，避免了泥石流对坝体的直接冲击，该结论从泥石流冲击压力过程曲线也

表 2 试验数据

Table 2 Test data

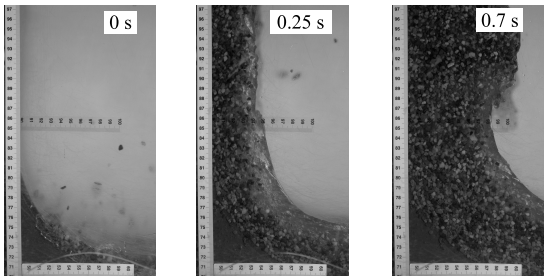
序号	结构形式	坡度/(°)	粒径组/cm	体积/m^3	密度/(kg·m^{-3})	流速/(m·s^{-1})	爬升高度/cm	冲击力/N
1-1	弧形	15	0.3～0.6	0.022	1 446	2.68	41.0	74.67
1-2	弧形	15	0.6～1.0	0.022	1 446	2.14	37.0	73.47
1-3	弧形	15	1.0～2.0	0.022	1 446	1.47	29.0	56.21
1-4	弧形	15	0.3～2.0	0.022	1 446	2.34	40.0	61.38
1-5	弧形	15	水	0.022	1 000	2.88	58.5	68.92
2-1	弧形	20	0.3～0.6	0.022	1 446	3.00	63.0	93.96
2-2	弧形	20	0.6～1.0	0.022	1 446	2.50	48.0	104.46
2-3	弧形	20	1.0～2.0	0.022	1 446	2.14	38.0	100.67
2-4	弧形	20	0.3～2.0	0.022	1 446	2.68	56.0	86.97
2-5	弧形	20	水	0.022	1 000	3.00	78.0	119.46
3-1	弧形	25	0.3～0.6	0.022	1 446	3.41	96.0	104.49
3-2	弧形	25	0.6～1.0	0.022	1 446	3.13	68.0	126.66
3-3	弧形	25	1.0～2.0	0.022	1 446	2.68	48.0	123.17
3-4	弧形	25	0.3～2.0	0.022	1 446	3.26	83.0	110.80
3-5	弧形	25	水	0.022	1 000	3.75	100.0	138.06
4-1	弧形	30	0.3～0.6	0.022	1 446	3.75	113.0	134.37
4-2	弧形	30	0.6～1.0	0.022	1 446	3.57	98.0	158.33
4-3	弧形	30	1.0～2.0	0.022	1 446	3.41	73.0	185.96
4-4	弧形	30	0.3～2.0	0.022	1 446	3.57	110.0	163.94
4-5	弧形	30	水	0.022	1 000	3.95	128.0	182.72
A-1	竖向	15	0.3～2.0	0.022	1 446	2.34	38.0	66.75
A-2	竖向	20	0.3～2.0	0.022	1 446	2.68	56.0	115.08
A-3	竖向	25	0.3～2.0	0.022	1 446	3.26	78.0	162.85
A-4	竖向	30	0.3～2.0	0.022	1 446	3.57	108.0	247.80

注：表格中 0.3～2.0 cm 代表的粒径组成如表 3 所示。

表 3 颗粒粒径组成

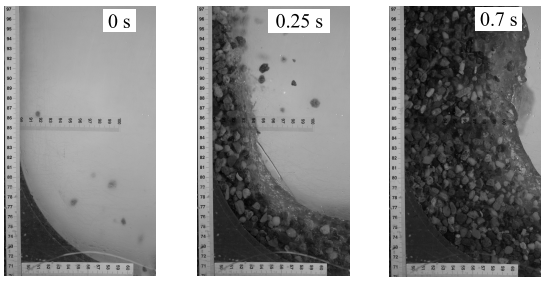
Table 3 Composition of grain size

颗粒粒径/cm	<0.1	0.1～0.3	0.3～0.6	0.6～1.0	1.0～2.0	>2.0
百分比/%	1.62	10.53	8.1	4.32	1.89	0.54



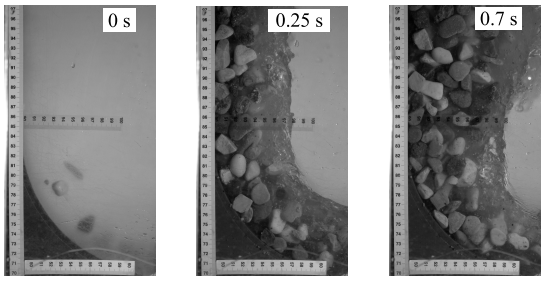
泥石流到达坝前　泥石流沿拦挡坝爬升　泥石流翻坝或回淤

(a) 弧形坝 0.3～0.6 cm



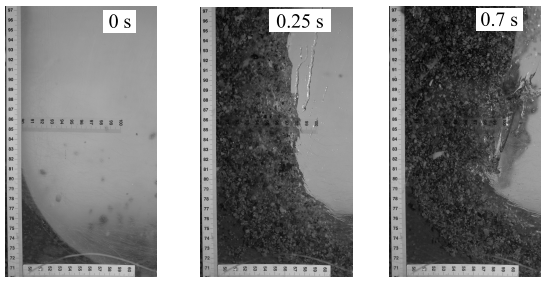
泥石流到达坝前　泥石流沿拦挡坝爬升　泥石流翻坝或回淤

(b) 弧形坝 0.6～1.0 cm



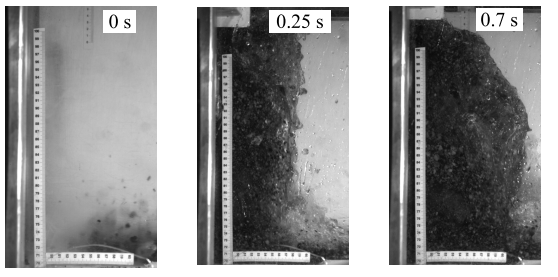
泥石流到达坝前　泥石流沿拦挡坝爬升　泥石流翻坝或回淤

(c) 弧形坝 1.0～2.0 cm



泥石流到达坝前　泥石流沿拦挡坝爬升　泥石流翻坝或回淤

(d) 弧形坝 0.3～2.0 cm



泥石流到达坝前　泥石流沿拦挡坝爬升　泥石流翻坝或回淤

(e) 竖向坝 0.3～2.0 cm

图 7　泥石流冲击拦挡坝过程图（$\alpha = 20^{\circ}$）

Fig.7　Impact process of debris flow against arc-shaped dam($\alpha = 20^{\circ}$)

得到了验证，冲击全程均未出现图 2(c)固定区。图 7(e)为泥石流冲击竖向拦挡坝运动过程，可观察到：在接触到竖向坝体的瞬间，冲击压力值最大，但随后形成弧形固定区，滑动面以下的固定区部分不再参与运动，泥石流沿着弧形面向上爬升。

4.4.2　泥石流不同粒径组对弧形拦挡坝冲击动力响应分析

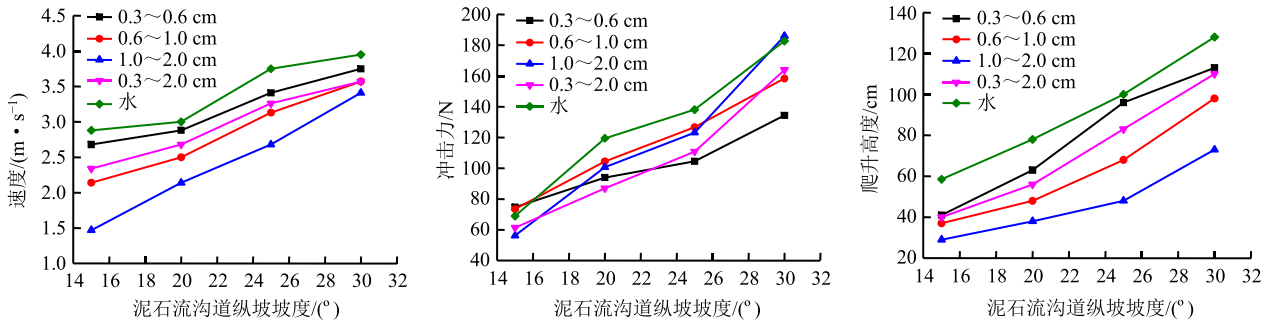
图 8(a)～8(c)为不同粒径组下泥石流沟道纵坡坡度与泥石流拦挡坝间流速、冲击力、爬升高度相关性曲线，结果表明，不同粒径组的泥石流对弧形拦挡坝的冲击响应也有一定差异。图 8(a)显示，在相同坡度下，伴随粒径组中粒径的增大，泥石流运动速度降低，而坡度越小，速度降低的越明显。分析原因在于泥石流颗粒粒径越大，运动过程中需要克服的重力势能及摩擦力就越大，越不利于泥石流运动，从而导致速度越小。图 8(b)可观察到，纵坡坡度较大时，伴随粒径组增大，冲击力也有一定程度增加。而该现象在纵坡坡度较小或泥石流流速较小时并不显著。图 8(c)结果表明，在相同的坡度下，伴随粒径的增大，泥石流爬升的高度同时降低。这是因为泥石流粒径越大，则在其爬升过程中需要克服的重力势能越大，越不利于泥石流运动，从而泥石流爬升高度呈现减小趋势。

此外，当粒径组介于 0.3～2.0 cm 时，与其他粒径组相比，由于流体内部粗细颗粒相互裹挟一起运动，其运动特性更加符合常见泥石流的运动规律。该粒径组的泥石流流速、冲击力、以及爬升高度结果基本介于 0.3～0.6 cm 粒径组以及 1.0～2.0 cm 粒径组之间。

试验结果同时表明，流速、冲击力、爬升高度与泥石流沟道纵坡坡度呈正相关关系且具有较好的相关性；冲击力、爬升高度随泥石流沟道纵坡坡度增加而增大。分析认为，随着沟道纵坡坡度增加，转化为动能的势能也相应增加，泥石流到达坝前流速增大，冲击力、爬升高度相应增大。

4.4.3　不同拦挡坝形式冲击力与爬高对比分析

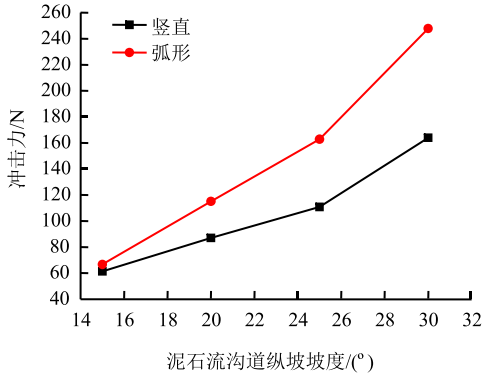
根据试验组数 1-4、2-4、3-4、4-4 及 A-1～A-4 绘制不同形式拦挡坝与冲击力、爬升高度的相关性曲线，如图 9 所示。图 9(b)表明，与竖向拦挡坝相比，弧形拦挡坝结构在爬升高度上无显著影响。原因在于，泥石流冲击上述两种坝体时，其运动形态基本一致，泥石流均是沿着弧形面爬升，区别在于泥石流冲击竖向拦挡坝时首先形成一个弧形固定面，而后再继续沿弧形面爬升，因此两种坝形在泥石流运动形态上并无显著差异。



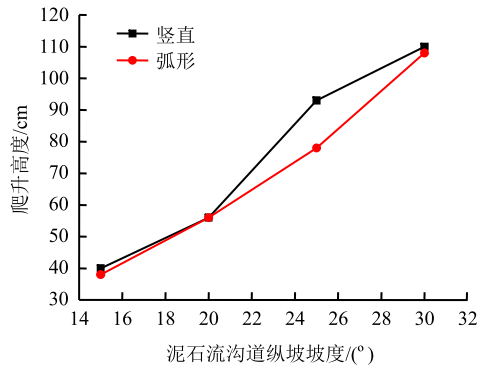
(a) 流速与沟道纵坡坡度相关性曲线 (b) 冲击力与纵坡坡度相关性曲线 (c) 爬升高度与纵坡坡度相关性曲线

图 8 泥石流沟道纵坡坡度与流速、冲击力、爬升高度的相关性

Fig.8 Correlation between inclination of the groove and flow velocity, impact force and run-up height



(a) 拦挡坝结构与冲击力相关性曲线



(b) 拦挡坝与爬升高度相关性曲线

图 9 泥石流冲击不同拦挡坝结构与冲击力、爬升高度的相关性

Fig.9 Correlation between dam structure and impact force, maximum run-up height

然而，在冲击力方面（见图 9(a)），当泥石流沟道纵坡坡度为 15°、20°、25°、30°时，弧形拦挡坝冲击力比竖向拦挡坝分别降低了 8.04%、24.43%、31.96%、33.86%，由此看出，将竖向结构优化为弧形，可较大地降低泥石流对坝体的法向冲击力，且随着泥石流沟道纵坡坡度的增大，冲击力的降低效果越明显。

5 理论模型与物理模型试验的对比分析

5.1 冲击力对比分析

图 10 为泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验中冲击力与 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 的相关性曲线。圆点代表试验所测得的冲击力数值，虚线为试验数据的拟合曲线，实线是根据理论公式（7）所绘制。从图中可以看出，理论公式的得到的冲击力数值与试验数据的相关性系数 r^2 为 0.68，冲击力理论公式与试验数据拟合总体较好。当 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}>6$ 时，出现了部分点离散的情况，其原因是当流速较大时，泥石流紊流作用较强，且由于理论公式作出了一系列假设，忽略了泥石流颗粒粒径组等的影响，使理论公式与试验数据存在一定差异。

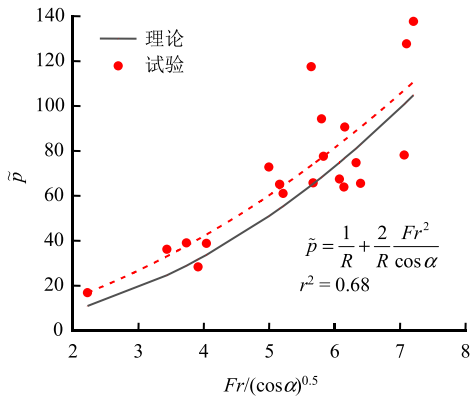


图 10 泥石流冲击力与 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 相关性曲线

Fig.10 Relationship between impact force and $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ of debris flow

图 11 为泥石流冲击力与 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 关系曲线，线 1 表示理论公式所得到的竖向型拦挡坝冲击力曲线，线 2、线 3 分别为弧形拦挡坝在不同半径取值时对应的的冲击力曲线。从图 11 可以看出，伴随

$Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 的增大，泥石流与拦挡坝间冲击力呈现上升趋势。弧形拦挡坝与竖向型拦挡坝冲击力值均与 Fr 呈二次关系，且与泥石流沟道纵坡坡度 α 的余弦值成反比。当 R = 1.5 m 时，弧形拦挡坝冲击力比竖向型拦挡坝减少了 33%；当 R = 2 m 时，弧形拦挡坝冲击力比竖向型拦挡坝减少了 50%。理论计算结果可进一步证实，在泥石流冲击拦挡坝过程中，弧形拦挡坝设计可明显降低泥石流对坝体的法向冲击力，从而起到保护结构的作用。

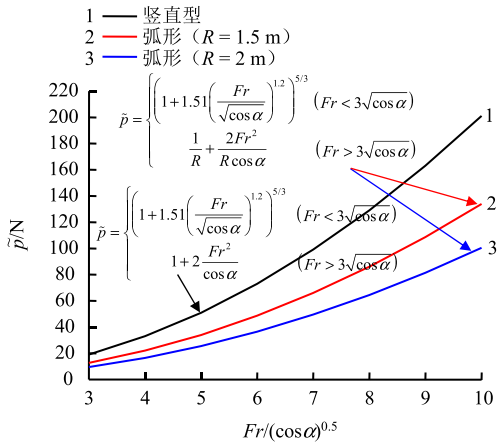


图 11　冲击力对比曲线

Fig.11　Correlation curves of impact force

5.2　爬升高度

图 12 为泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验中无量纲爬升高度与 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 的相关性曲线。圆点代表试验所测得数值，虚线为试验数据的拟合曲线，实线根据无量纲爬升高度理论公式（16）所绘制。图 12 结果表明，泥石流与拦挡坝间无量纲爬升高度随着 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 的增大而增大，理论公式的得到的无量纲爬升高度数值与试验数据的相关性系数 r^2 为 0.938，爬升高度理论公式与试验数据高度拟合。

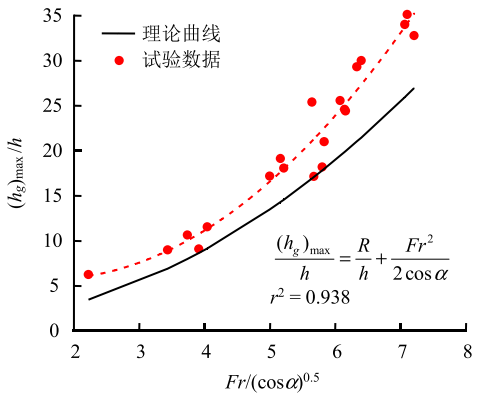


图 12　泥石流无量纲爬升高度与 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 相关性曲线

Fig.12　Relationships between dimensionless maximum run-up height and $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ of debris flow

图 13 为泥石流冲击拦挡坝无量纲爬升高度与 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 关系曲线。线 1 表示竖向型拦挡坝爬升高度曲线，线 2、线 3 分别为圆弧形拦挡坝在 $R = 2h$、$R = 3h$ 的爬升高度曲线。当 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5} = 4$ 时，竖向型拦挡坝与弧形拦挡坝在 $R = 2h$、$R = 3h$ 爬升高度变化率分别为 10.0%、18.18%；当 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5} = 7$ 时，竖向型拦挡坝与弧形拦挡坝在 $R = 2h$、$R = 3h$ 爬升高度变化率分别为 3.73%、7.27%。泥石流与拦挡坝间无量纲爬升高度随着 $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ 增大而增大，但弧形拦挡坝与竖向型拦挡坝的爬升高度相差不大，由此看出将拦挡坝结构优化为弧形，对泥石流冲击拦挡坝爬升高度几乎没有影响。

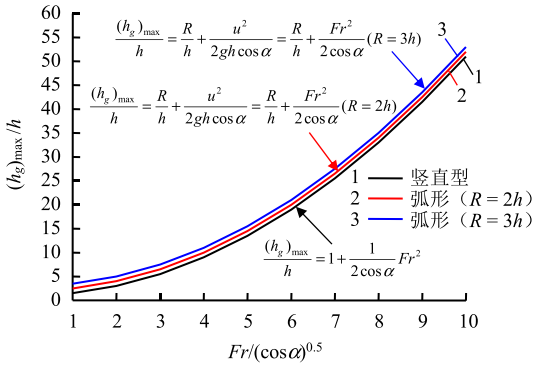


图 13　无量纲爬升高度对比曲线

Fig.13　Relationship between dimensionless maximum run-up height and $Fr/(\cos\alpha)^{0.5}$ of debris flow

6　结　论

本文将目前常见的泥石流竖向拦挡坝结构优化为弧形拦挡坝结构，并开展泥石流冲击弧形拦挡坝结构动力响应研究，建立泥石流−弧形拦挡坝冲击力及爬升高度理论计算公式，并与泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验进行验证，得到结论如下：

（1）根据质量、能量、动量守恒 3 大定律建立了泥石流对弧形拦挡坝的冲击力及爬升高度计算公式。冲击力及爬升高度主要受弗洛德数 Fr、泥石流沟道纵坡坡度 α 及弧形半径 R 控制，冲击力与爬升高度均和弗洛德数 Fr 呈二次关系，与泥石流沟道纵坡坡度 α 的余弦值成反比。

（2）泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验结果表明，泥石流流速、冲击力、爬升高度与泥石流沟道纵坡坡度呈正相关关系；在相同的坡度下，伴随粒径组中粒径的增大，泥石流运动速度降低，坡度越小，速度降低的越明显，泥石流爬升的高度也同时降低；纵坡坡度较大时，伴随粒径组增大，冲击

力也有一定程度增加，而该现象在纵坡坡度较小或泥石流流速较小时并不显著。

（3）与竖向型拦挡坝相比，弧形拦挡坝在爬升高度上几乎没有影响，但试验与理论计算结果表明，引入弧形段能显著降低泥石流对坝体的法向冲击力。

（4）泥石流冲击弧形拦挡坝物理模型试验结果与理论公式结果拟合较好，表明该公式可为弧形拦挡坝的结构设计提供理论支持。

（5）由于在实际工程中还未见有弧形拦挡坝工程的实施，因此在工程设计时，若采用弧形拦挡坝结构，还需对该结构的结构形式、材料以及坝基基础进行抗冲击、滑移、抗倾覆、地基承载力、强度验算等专题研究，以满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. 水土保持科学, 2009, 7(5): 7-13.
CUI Peng. Advances in debris flow prevention in China[J]. **Science of Soil and Water Conservation**, 2009, 7(5): 7-13.

[2] 王文甫, 胡振邦. 舟曲泥石流堰塞坝稳定性分析及应急预案研究[J]. 水力发电, 2019, 45(8): 33-35.
WANG Wen-fu, HU Zhen-bang. Zhouqu debris flow dam stability analysis and emergency plan study[J]. **Water Power**, 2019, 45(8): 33-35.

[3] BAI S B, WANG J, ZHANG Z G, et al. Combined landslide susceptibility mapping after Wenchuan earthquake at the Zhouqu segment in the Bailongjiang Basin, China[J]. **Catena**, 2012, 99: 18-25.

[4] 许强, 李骅锦, 何雨森, 等. 文家沟泥石流治理工程效果的定量分析评价[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1046-1056.
XU Qiang, LI Hua-jin, HE Yu-sen, et al. Quantitative evaluation of engineering treatments for prevention of debris flow at Wenjia Gully[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2017, 25(4): 1046-1056.

[5] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 68-72.
YOU Yong, CHEN Xing-chang, LIU Jin-feng. "8 · 13" Extraordinary debris flow disaster in Wenjia Gully, Qingping Town, Mianzhu, Sichuan[J]. **Journal of Catastrophe**, 2011, 26(4): 68-72.

[6] 齐得旭, 闫俊, 张云卫. 泥石流拦挡坝破坏模式调查分析[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 89-91, 98.
QI De-xu, YAN Jun, ZHANG Yun-wei. Investigation and analysis on failure mode of dam[J]. **Resources Environment & Engineering**, 2018, 32(1): 89-91, 98.

[7] 柳春, 余志祥, 骆丽茹, 等. 含大块石泥石流冲击作用下混凝土拦挡坝的动力学行为研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14): 161-168, 238.
LIU Chun, YU Zhi-xiang, LUO Li-ru, et al. Dynamic behavior of a concrete dam impacted by debris flows with rock[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2019, 38(14): 161-168, 238.

[8] 刘道川, 游勇, 杜杰, 等. 泥石流冲击力的时空分布特征[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3): 17-25.
LIU Dao-chuan, YOU Yong, DU Jie, et al. Spatio-temporal distribution of the impact force of debris flow[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2019, 51(3): 17-25.

[9] 胡凯衡, 韦方强, 洪勇, 等. 泥石流冲击力的野外测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2813-2819.
HU Kai-heng, WEI Fang-qiang, HONG Yong, et al. Field measurement of impact force of debris flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Suppl.1): 2813-2819.

[10] 李泳, 陈晓清, 胡凯衡, 等. 泥石流颗粒组成的分形特征[J]. 地理学报, 2005, 60(3): 495-502.
LI Yong, CHEN Xiao-qing, HU Kai-heng, et al. Fractality of grain composition of debris flows[J]. **Journal of Geographical Sciences**, 2005, 60(3): 495-502.

[11] 陈兴长, 陈慧, 游勇, 等. 泥石流拦砂坝底扬压力分布及影响因素试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3219-3236.
CHEN Xing-zhang, CHEN Hui, YOU Yong, et al. Experiment on distribution and influence factors of uplift pressure acting on bottom of debris flow check dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3219-3236.

[12] 何思明, 李新坡, 吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1664-1669.
HE Si-ming, LI Xin-po, WU Yong. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1664-1669.

[13] 何思明, 吴永, 沈均. 泥石流大块石冲击力的简化计算[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 51-56.
HE Si-ming, WU Yong, SHEN Jun. Simplified calculation of impact force of massive stone in debris flow[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2009, 18(5): 51-56.

[14] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅, 等. 泥石流冲击荷载的时频分析方法及应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(3): 255-260.
CHEN Hong-kai, XIAN Xue-fu, TANG Hong-mei, et al. Time-frequency analysis method of debris flow impact loads and its application[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2011, 31(3): 255-260.

[15] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福, 等. 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 124-127.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, XIAN Xue-fu, et al. Probability distribution features of fluctuating impact force of debris flow[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, 29(8): 124-127.

[16] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福, 等. 泥石流冲击特性模型试验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 114-119.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, XIAN Xue-fu, et al. Experimental model of debris flow impact features[J]. **Journal of Chongqing University**, 2010, 33(5): 114-119.

[17] 李俊杰, 王秀丽, 冉永红. 泥石流块石冲击下新型拦挡坝动力响应试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(5): 889-896.
LI Jun-jie, WANG Xiu-li, RAN Yong-hong. Experimental study dynamic response of a new dam to the impact of block stones in debris flow[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2018, 39(5): 889-896.

[18] 李俊杰, 王秀丽, 朱彦鹏, 等. 冲击荷载下带支撑泥石流拦挡坝动力响应试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(18): 79-86.
LI Jun-jie, WANG Xiu-li, ZHU Yan-peng, et al. Experimental study on dynamic response of debris flow dam with braces under impact loads[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2015, 34(18): 79-86.

[19] 王秀丽, 胡志明, 崔晓燕. 泥石流巨石冲击下的钢构格栅坝动力响应分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 30-36.
WANG Xiu-li, HU Zhi-ming, CUI Xiao-yan. Dynamic response analysis of steel grille dam under the impact of big stones in debris flow[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2014, 25(4): 30-36.

[20] 王东坡, 陈政, 何思明, 等. 泥石流冲击桥墩动力相互作用物理模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3363-3392.
WANG Dong-po, CHEN Zhen, HE Si-ming, et al. Physical model experiments of dynamic interaction between debris flow and bridge pier model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3363-3392.

[21] VAGNON F, SEGALINI A. Debris flow impact estimation on a rigid barrier[J]. **Natural Hazards and Earth System Science**, 2016, 16(7): 1691-1697.

[22] ARMANINI A, ROSSI G, LARCHER M. Dynamic impact of a water and sediments surge against a rigid wall[J]. **Journal of Hydraulic Research**, 2019, 58(2) 314-325.

[23] KOO R C H, KWAN J S H, NG C W W, et al. Velocity attenuation of debris flows and a new momentum-based load model for rigid barriers[J]. **Landslides**, 14(2): 617-629.

[24] KWAN J S H. Supplementary technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers[C]//GEO Report No.270. Hong Kong: Geotecnical Engineering Office, 2012.

[25] WENDELER. Murgangrückhalt in wildbachen–grundlagen zu planung und berechnung von flexible Barrieren[D]. Switzerland: ETH Zürich, 2008.

[26] KWAN J S H. Supplementary technical guidance on design of rigiddebris-resisting barriers[C]//GEO Report No.270. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 2012.

[27] ARMANINI A. On the dynamic impact of debris flows[M]. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[28] ARMANINI A. Granular flows driven by gravity[J]. **Journal of Hydraulic Research**, 2013, 51(2): 111-120.

[29] ARMANINI A. Closure relations for mobile bed debris flows in a wide range of slopes and concentrations[J]. **Advances in Water Resources**, 2015, 81: 75-83.