

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220824003

# 基于SPH-FEM耦合方法的泥石流冲击输电塔基础的动力分析\*

于虹<sup>1</sup>, 李昊<sup>1</sup>, 许标<sup>2</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 汪大海<sup>2</sup>, 张志强<sup>3</sup>, 张贵峰<sup>3</sup>

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南昆明 650214; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070; 3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东广州 510663)

**摘要:** 泥石流是我国西南山区常见的地质灾害。架空输电杆塔在泥石流的冲击下往往发生基础破坏甚至会造成杆塔倒塌。首先采用光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, 简称SPH)方法和有限元方法(finite element method, 简称FEM)相耦合的三维数值方法模拟了泥石流对杆塔基础的冲击作用;在与相关模型试验结果验证的基础上,开展了不同泥石流密度、黏度系数及初始速度条件下对输电塔基础的冲击力作用的参数分析;研究结果表明:随着泥石流初始速度的增加,冲击力峰值会随之增大;前排基础的冲击力峰值均大于后排基础;泥石流冲击过程特性受到泥石流密度和黏度系数影响。与稀性泥石流相比:黏性泥石流冲击基础后,基础下游真空区相对要小;此外,将数值模拟结果与Kwan冲击力公式及铁二院推荐的冲击压力设计公式预测值进行对比分析可以发现:Kwan冲击力公式能较好地预测出基础所受泥石流冲击力的平均趋势,最大预测误差低于30%,铁二院公式预测的稀性和黏性泥石流的冲击压力平均偏低分别约17%和28%。相关研究结果有望为泥石流频发区域输电塔基础的设计和风险评估提供一定的参考依据。

**关键词:** SPH-FEM耦合方法; 泥石流; 输电塔基础; 冲击力; 流固耦合

**中图分类号:** TV312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0068-11

## Dynamic Response of Transmission Tower Foundation Impacted by Debris Flow Using Coupled SPH-FEM Method

YU Hong<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, XU Biao<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, WANG Dahai<sup>2</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>3</sup>, ZHANG Guifeng<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650214, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. CSG Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** In southwest China, there are numerous transmission lines built in mountainous areas with frequent debris flows. The transmission towers hit by debris flows may tilt or even collapse. After being validated by relevant experimental results, a series of three-dimensional numerical analyses are performed on the dynamic response of transmission tower foundations impacted by debris flows using the coupled smoothed particle hydrodynamics (SPH) and finite element method (FEM). The parameters

\* 收稿日期:2022-08-24;修回日期:2022-12-02

基金项目:云南电网科技项目(YNKJXM20210181)资助

作者简介:于虹(1978—),女,教授级高工,博士。主要从事输电线路防灾减灾研究。E-mail:yuhong2388245@163.com

通讯作者:张磊(1983—),男,副教授,博导,博士。主要从事岩土工程防灾减灾方面的教学与研究。

E-mail: zhangleigeo@whut.edu.cn

analyses including debris flow density, viscosity coefficient and initial velocity are considered. For all the scenarios considered, the frontal foundation experiences comparatively larger impact forces than the rear foundation. The peak impact force tends to gradually increase with the increasing initial velocity while the debris flow process is mainly affected by density and viscosity coefficient. The impact processes caused by low-viscosity and high-viscosity debris flows are different. Low-viscosity debris flows produce a smaller vacuum area in the downstream flow path of the foundation. In addition, the numerical simulation results are compared with the predictions of Kwan's formula for impact force and code-recommended formula for impact pressure. It is found that the Kwan's formula can well predict the average trend of the impact force of the debris flow on the foundation, and the maximum prediction error is less than 30%. The average impact pressure of low-viscosity and high-viscosity debris flows predicted by the code-recommended formula are about 17% and 28% lower, respectively. The relevant investigation results can likely provide a useful reference for the design and risk assessment of transmission tower foundations in areas where debris flows are frequently observed.

**Keywords:** coupled SPH-FEM method; debris flow; transmission tower foundation; impact; fluid-solid interaction

## 0 引言

泥石流是一类常见的地质灾害,具有成因复杂、突发性强、成灾迅速、破坏性强等特点,对其附近人员的生命财产安全和各类基础设施的安全稳定性造成了极大的威胁<sup>[1-2]</sup>,泥石流灾害一直是国内外防灾减灾领域中备受关注的焦点之一<sup>[3-5]</sup>。我国有大量的输电线路和变电站建于地质灾害频发的山地区域,如图1所示,由于泥石流对输电塔基础的冲击作用,输电塔往往会发生倾斜甚至倒塌破坏,从而带来巨大的经济损失。因此,泥石流频发区域输电塔的安全稳定性主要取决于其基础抵抗泥石流冲击的能力。



图1 泥石流冲击作用下杆塔发生倾斜

Fig.1 Tilt of transmission tower due to impact of debris flow  
注:(<https://image.baidu.com/>)

国内外学者对泥石流的冲击动力特性开展了大量的研究工作<sup>[6]</sup>,采用的研究方法主要是模型试验与数值模拟。在模型试验方面,何晓英等<sup>[7]</sup>以平

川泥石流为原型,通过模型试验探究了黏性泥石流的运动与冲击特性,发现泥石流冲击力随浆体黏度、固相比及颗粒粒径的增大而呈非线性增大趋势;朱志鹏等<sup>[8]</sup>研究了泥石流对路基的冲淤作用规律,发现泥石流对路基的冲击压力与流通区坡度、泥石流总量和重度呈正相关关系;王东坡等<sup>[9-11]</sup>开展了不同粒径、不同坡度条件下泥石流对桥墩、拦挡坝以及开口柔性防护网的冲击物理模型试验,研究发现:稀性泥石流相对于黏性泥石流而言对桥墩的冲击能量明显更大,泥石流对弧形拦挡坝的冲击力小于其对传统竖向拦挡坝的冲击力,开口柔性防护网对泥石流的拦截率分别与泥石流相对密度和弗罗德数呈正相关和负相关关系。

在数值分析方面,通常采用等效荷载法<sup>[12]</sup>、集中块体冲击法<sup>[13-14]</sup>和流体动力分析法<sup>[15-16]</sup>来模拟泥石流对结构物的冲击作用。相对前两种方法,流体动力分析法能同时模拟出泥石流的流动特性和动态冲击过程,也因此泥石流数值分析领域得到更为广泛的运用。柳春等<sup>[15]</sup>、黄云<sup>[16]</sup>通过 SPH-FEM 耦合数值方法分别研究了大块石-泥石流浆体-拦挡坝体系与块石-浆体-桥墩体系相互作用,分析了泥石流作用下拦挡坝与桥墩的抗冲击特性。梁恒等<sup>[17]</sup>使用 SPH-FEM 耦合数值方法构建了泥石流冲击桥墩的三维数值计算模型,并进行了泥石流冲击桥墩的室内水槽试验。丁鸿超等<sup>[18]</sup>为研究黏性泥石流冲击油气管道的动力特性,基于 SPH-FEM 耦合数值方法建立了泥石流与管道的耦合模型,得

到了泥石流冲击作用下管道不同位置处位移与应力的变化规律。方君等<sup>[19]</sup>使用离散元(Discrete Element Method)和计算流体力学(Computational Fluid Dynamic)耦合方法(CFD-DEM)模拟单相流和两相流对刚性防护结构的冲击,研究了泥石流与刚性防护结构的作用特性。

现阶段研究泥石流对结构的冲击作用时,通常以桥墩和拦挡坝等作为主要的研究对象,而关于泥石流对杆塔基础冲击作用的研究较为匮乏。由于上部结构类型的不同,杆塔基础与桥墩等结构的布置方式有明显的区别:杆塔基础的几何尺寸、出露地表高度和承载力均较小,通常由若干个独立基础组成,独立基础之间的间距较小;与桥墩等结构不同,泥石流冲刷作用下杆塔基础所受冲击力的大小与泥石流的绕流过程和其所处位置直接相关。泥石流对塔杆基础的冲击力不容忽视<sup>[20]</sup>,当输电线塔基位于不稳定斜坡时,塔基安全由上部斜坡稳定性控制,斜坡变形失稳和泥石流滑体极易导致塔基的失效<sup>[21]</sup>。本文以建于岩质边坡上的嵌固式输电塔基础为研究对象,采用Bingham流体模型来模拟泥石流的流动特性,通过SPH-FEM耦合分析,考虑泥石流物理参数及流速等因素的影响,探究泥石流对输电塔基础的冲击效应,从而为岩质边坡上输电塔基础的设计提供一定的参考。

## 1 SPH 数学模型

### 1.1 SPH 方法基本理论

SPH方法是一种基于拉格朗日描述的无网格方法,其最早由L.B.Lucy<sup>[22]</sup>和R.A.Gingold等<sup>[23]</sup>分别独立提出,用于解决三维开放天体物理问题。利用SPH方法模拟流体时克服了网格模拟流体大变形计算不收敛等问题,越来越多的学者采用这种方法来模拟泥石流对结构物的冲击作用<sup>[15-19]</sup>。

SPH用近似核函数的方式来表示某个粒子对周围粒子的影响,每一个粒子都有自身的物理属性(速度,黏度,能量等),利用每个粒子的核函数方程可以描述流体的宏观运动<sup>[18]</sup>。SPH方程的构建分以核函数的光滑近似和核函数方程的粒子近似为原则,其中核函数的光滑近似的一般形式为:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

式中, $W(x-x', h)$ 为光滑核函数; $f(x)$ 为 $x$ 的函数; $\Omega$ 为 $x$ 的支持域; $h$ 为光滑长度; $x$ 和 $x'$ 分别为任意三维坐标向量和给定位置的三维坐标向量。

将核函数近似的积分形式转化离散形式,则粒子 $i$ 处的场函数及其导数的粒子近似表达可写为:

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^N f(x_j) W(x_i - x_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (2)$$

$$\nabla f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla W(x_i - x_j, h) \quad (3)$$

式中,下标 $i, j$ 为粒子编号; $m_j$ 为 $j$ 粒子质量; $\rho_j$ 为 $j$ 粒子密度; $r_{ij}$ 为粒子之间的距离; $N$ 为影响域内粒子数量。

SPH模型以Navier-Stokes(N-S)方程作为泥石流的运动控制方程来描述粒子运动状态<sup>[24]</sup>。N-S方程是在质量、动量守恒方程的基础上改写的一组采用拉格朗日描述的偏微分方程。质量守恒方程和动量守恒方程为:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (4)$$

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} + F^\alpha \quad (5)$$

式中, $\rho$ 为流动过程中流体的密度; $\alpha, \beta$ 为空间方向; $\sigma$ 为应力; $F$ 为体力; $v$ 为速度。

在SPH方法中,常用状态方程<sup>[25]</sup>来确定粒子的压力,如下式所示:

$$p = p_0 \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\lambda - 1 \right] \quad (6)$$

式中, $\lambda$ 为常数,一般取7; $\rho_0$ 为参考密度,通常取流体的初始密度; $p_0 = c_0^2 \rho_0 / \lambda$ , $c_0$ 为参考密度下的声速,

$$c_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}, K \text{ 为流体的体积模量。}$$

基于光滑核函数,SPH粒子的黏性力表达式为:

$$F_i^v = \mu \sum_{j=1}^N m_j \frac{v_j - v_i}{\rho_j} \nabla^2 W(x_i - x_j, h) \quad (7)$$

式中, $F_i^v$ 为粒子所受黏性力; $\mu$ 为黏度系数; $m$ 为粒子质量。

SPH方法中常用的粒子边界处理方法主要包括三种:虚粒子法、惩罚力法和边界积分法,而这些方法都不可避免地存在计算量较大、设置条件复杂等问题,详细信息参见文献[17,26]。本文的边界

处理方法详见第 2.3 节中的介绍。

### 1.2 Bingham 流体模型

Bingham 流体模型能较好地反映出物质的流体特征,也因此被广泛用于模拟泥石流的流动特性<sup>[17-18]</sup>。浆体的流变特性是指其受剪切变形时的剪应力与剪切率的关系,与牛顿流体黏度的定义方式类似,非牛顿流体的黏度 $\mu$ 也可表示为剪应力 $\tau$ 与剪切率 $\dot{\gamma}$ 的函数,即:

$$\eta = f(\tau, \dot{\gamma}) \quad (8)$$

由式(8)可知,非牛顿流体的流变特性主要由黏度决定,泥石流的流变特性服从 Bingham 流体特性,其剪应力与剪切率的关系可表示为<sup>[27]</sup>:

$$\tau = \tau_y + \mu(\dot{\gamma}) \quad (9)$$

式中, $\tau_y$ 为屈服应力或极限剪应力; $\mu$ 为 Bingham 流体的黏度。

由式(9)可以看出,Bingham 流体带有一定的黏塑性,计算模型可以简化为由一个阻尼器和一个牛顿黏壶并联组成的一个系统,如图 2 所示。

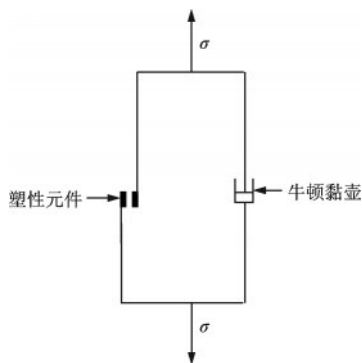


图 2 Bingham 流体力学模型  
Fig.2 Bingham fluid model

### 1.3 数值方法的验证

以文献[17]中模型试验为对比参照,建立了相应的三维数值模型并开展了 SPH-FEM 耦合分析,数值计算模型如图 3 所示。

如图 4 所示,无论是考虑稀性还是黏性泥石流冲击桥墩结构,尽管存在一些局部差异性,本文所得的冲击压力计算值与模型试验实测值之间的整体吻合度较高,验证了本文数值模拟方法的计算可靠性。

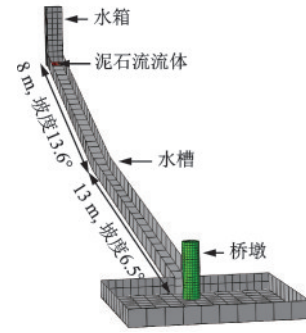


图 3 参考文献[17]中模型试验对应的数值模型  
Fig.3 Numerical model corresponding to model test in reference [17]

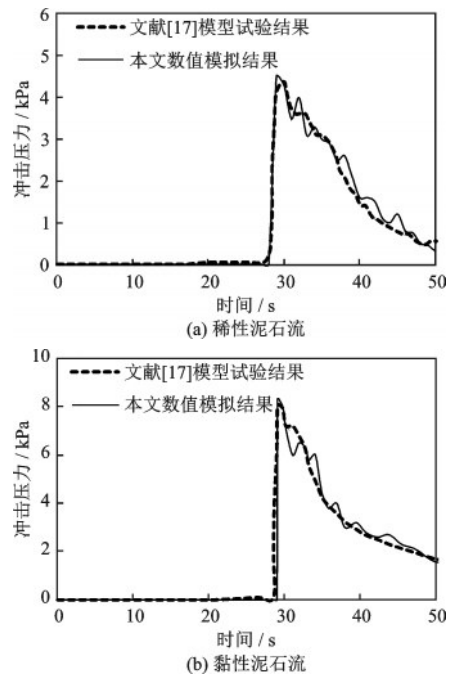


图 4 泥石流冲击压力时程曲线对比

Fig.4 Comparison of impact pressure time histories induced by debris flows

## 2 建立计算模型

### 2.1 几何模型

图 5 为以西南山区某岩质边坡下输电杆塔基础为例建立的数值模型。数值模型由基岩坡体、泥石流浆体、杆塔基础三部分组成。其中主坡段较为陡峭,坡度为 25°,地处泥石流的生成及主要滑动区域;杆塔基础为 4 个独立的嵌固式基础,建造于坡度为 5°的缓坡段。杆塔基础总高为 2.7 m,前排基础露头高度为 0.37 m,后排基础露头高度为 0.9 m。

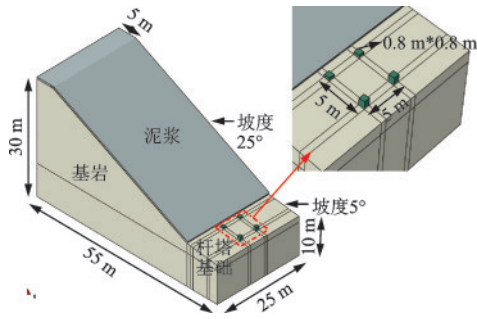


图5 边坡及输电塔基础的几何模型

Fig.5 Geometric model of the slope and transmission tower foundation

## 2.2 材料模型

对于基岩,由于其强度和刚度均高,在泥石流冲击过程中,可以忽略其自身变形。输电塔基础材料选用钢筋混凝土,忽略其在泥石流冲击过程中可能发生的局部结构损伤。因此在数值模拟中基岩和输电塔基础均考虑为弹性体,相关参数见表1。

泥石流属于非牛顿流体,其本构关系十分复杂,根据《中国泥石流研究》<sup>[28]</sup>中按照泥石流性质对泥石流进行分类(表2)。

表1 基岩及输电塔基础材料参数

Table 1 Material parameters adopted for rock and transmission tower foundation

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t·m <sup>-3</sup> )
基岩	80	0.15	2.35
钢筋混凝土基础	30	0.15	2.5

表2 泥石流按流体性质进行分类

Table 2 Types of debris flows in terms of fluid viscosity

按性质分类	密度/(t·m <sup>-3</sup> )	黏度系数/(Pa·s)	备注
稀性泥石流	1.4~1.7	0.1~0.15	接近水流特性
亚黏性泥石流	1.7~1.95	0.15~0.5	紊动很微弱
黏性泥石流	1.95~2.3	0.5~3.0	速度快4~8 m/s

本文的数值模拟中,重点考虑两类泥石流,分别为稀性泥石流和黏性泥石流,并考虑了不同的泥石流密度、黏度系数和初始速度。其中,不同初始速度用以间接考虑不同斜坡高度对泥石流冲击特性的影响。本文中暂不考虑坡角的变化,通过数值模拟和理论计算选取泥石流的初始速度分别为0、8.7、12.2、15、16.8、23.8 m/s,对应的斜坡高度分别是30、35、40、45、49、68 m。泥浆材料参数选取见表3。

表3 泥浆材料参数

Table 3 Material parameters used for debris flows

编号	流体类型	黏度系数/(Pa·s)	密度/(t·m <sup>-3</sup> )	初始速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	稀性	0.1	1.4	0
2	稀性	0.1	1.475	0
3	稀性	0.1	1.55	0
4	稀性	0.1	1.55	8.7
5	稀性	0.1	1.55	12.2
6	稀性	0.1	1.55	15
7	稀性	0.1	1.55	16.8
8	稀性	0.1	1.55	23.8
9	稀性	0.1	1.625	0
10	稀性	0.1	1.7	0
11	黏性	0.5	1.8	0
12	黏性	0.5	1.95	0
13	黏性	0.5	2.05	0
14	黏性	0.5	2.15	0
15	黏性	0.5	2.15	8.7
16	黏性	0.5	2.15	12.2
17	黏性	0.5	2.15	15
18	黏性	0.5	2.15	16.8
19	黏性	0.5	2.15	23.8
20	黏性	0.5	2.3	0
21	黏性	1.5	2.15	0
22	黏性	2.5	2.15	0
23	黏性	3	2.15	0

## 2.3 半对称数值模型

在进行数值模拟时,为了提高数值计算效率,建立了半对称数值模型,半对称边界采用刚性体边界。在正式的计算分析前,针对FEM网格尺寸及SPH颗粒尺寸开展了敏感性分析,其中FEM的单元数量考虑了4组(单元数量为2 836~10 096),不同FEM单元数下输电杆塔前排基础所受冲击力峰值的计算结果如图6所示;以FEM单元数分别为3 504和10 096的两组模型来比较,两者计算所得的冲击力峰值之差约6%,但计算运行时间分别约为4小时和6小时(计算机配置:16核、16 G内存、2.5 GHz i7-11700处理器),后者相对前者的计算效率降低了约50%。类似地,保持FEM单元数为3 504,考虑了7组SPH颗粒数量(颗粒数量为3 486~125 000),不同SPH粒子数下输电杆塔前排基础所受冲击力峰值的计算结果如图7所示;当

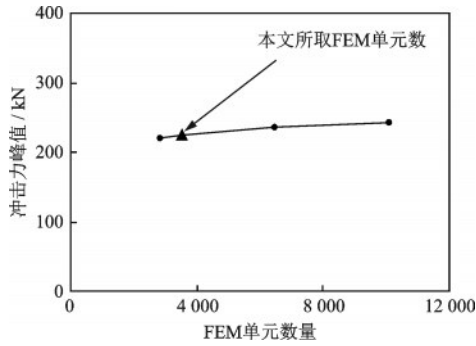


图6 不同FEM单元数下泥石流对输电杆塔前排基础的冲击力峰值变化

Fig.6 Debris flow induced peak impact forces on the frontal foundation involving different number of FEM elements

SPH粒子数超过20 000时,基础所受冲击力峰值基本保持稳定,以SPH粒子分别为31 500和125 000的两组模型来比较,两者对应的基础所受冲击力峰值的差值小于10%,但计算运行时间由不到4小时增长至约12.2小时,后者相对前者的计算效率降低了约205%。综上,以杆塔基础所受冲击力峰值是否基本收敛为基准和兼顾较为合理的计算效率,最终分别选用了3 504个FEM单元和31 500个SPH粒子,所建立的有限元模型如图8所示。

泥石流重力加速度为 $9.8 \text{ m/s}^2$ ,初始速度在预定义场中施加。除坡面外,基岩的侧面约束其法向自由度。为了防止粒子意外逃逸,泥石流浆体的两侧面(垂直于斜坡走向)需要对其进行法向约束;对于本文的SPH-FEM耦合模型,采用有限单元(即离散刚体单元)为SPH粒子施加边界条件:模型左右两侧粒子采用离散刚体单元进行约束,粒子与刚体之间采用切向无摩擦、法向硬接触的相互作用关

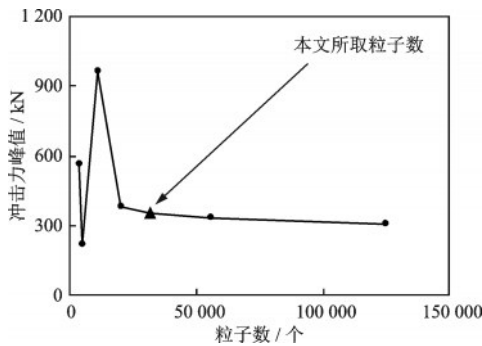


图7 不同SPH粒子数下泥石流对输电杆塔前排基础的冲击力峰值变化

Fig.7 Debris flow induced peak impact forces on the frontal foundation involving different number of SPH particles

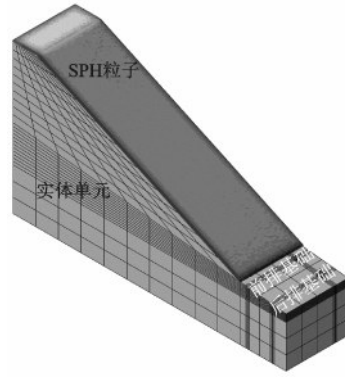


图8 半对称计算模型

Fig.8 Half numerical model

系。该方法避免了常用SPH粒子边界方法的复杂性和欠稳定性,其可靠性也得到了前期相关研究的验证<sup>[29]</sup>。

有限元算法在计算固体受力特性时具有较高的准确性和计算效率,而SPH方法在模拟介质大变形时具有较大优势,SPH-FEM耦合方法可以综合发挥二者的优势。在ABAQUS中,SPH粒子与FEM单元之间采用点面接触关系以实现二者耦合,通过罚函数算法来传递两者之间的相互作用力<sup>[16]</sup>。泥石流浆体与基岩和基础表面之间的摩擦系数取0.12<sup>[15]</sup>。

### 3 计算分析

#### 3.1 冲击过程分析

泥石流的冲击过程受其性质的影响而发生变化,不同编号泥石流的冲击过程如图9所示。在冲击基础之后,基础后侧泥石流速度减小并向基础两侧扩散,在扩散过程中,由于黏性泥石流的黏度系数和所受阻力增加,导致前排基础下游真空区的长度和宽度减小,泥石流迅速向前排基础下游靠拢,填充下游空白区域。此现象与梁恒等<sup>[17]</sup>得到的泥石流堆积过程模拟结果较为一致。

#### 3.2 冲击力的参数分析

##### 3.2.1 初始速度的影响

以黏度系数为 $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,密度为 $1.55 \text{ t/m}^3$ 的稀性泥石流为例,在不同初始速度下对基础的冲击力时程曲线如图10所示,可见随着初始速度的增加,冲击历程逐渐缩短,冲击力峰值出现的时刻逐渐提前,冲击力峰值也逐渐增大;前排基础所受的冲击

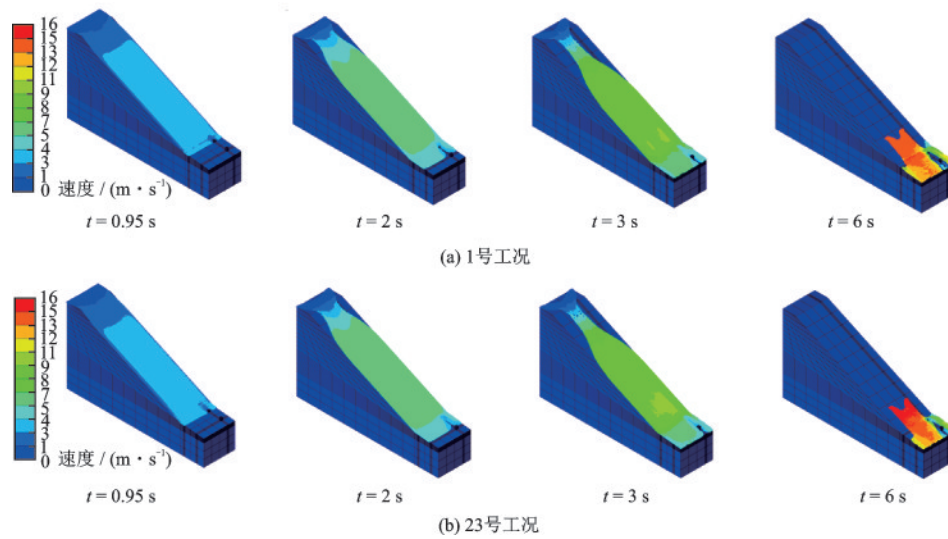


图9 泥石流冲击过程

Fig.9 Debris flow impact process

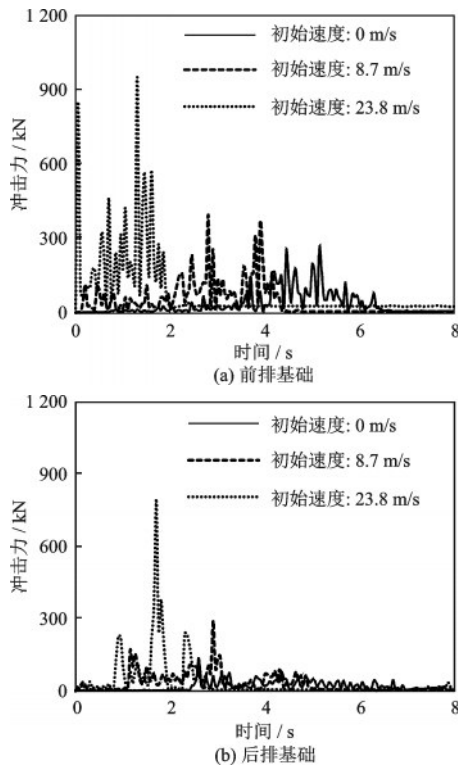


图10 不同泥石流初始速度下基础所受冲击力的时程曲线  
Fig.10 Debris flow induced impact force time histories on foundation involving different initial velocities

力要明显大于后排基础,表明基础在承受泥石流冲击荷载时存在一定的遮蔽效应。稀性和黏性泥石流在不同初始速度作用下基础所受冲击力峰值的变化曲线如图11所示,可见当初速度为12~16 m/s时,基础所受冲击力峰值的增速最快。当初速度大于15 m/s时,稀性泥石流对基础的冲击力峰

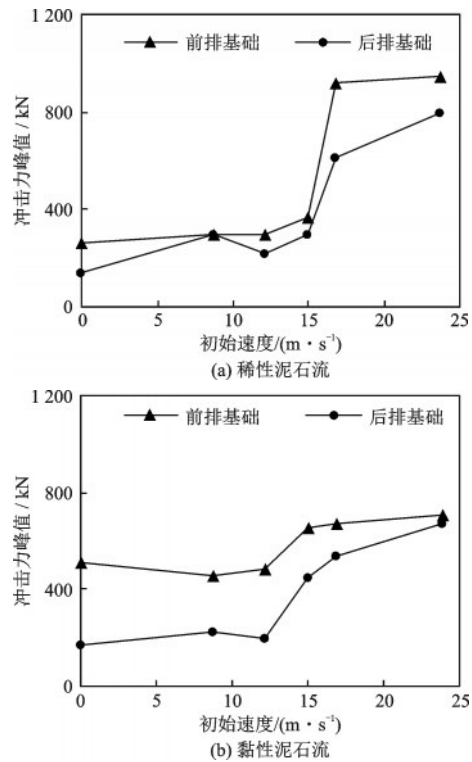


图11 不同泥石流初始速度下基础所受冲击力的峰值变化  
Fig.11 Debris flow induced peak impact forces on foundation involving different initial velocities

值明显大于黏性泥石流。总体而言,随着初始速度的增加,前排基础对后排基础的遮蔽效应呈减弱趋势,特别是对黏性泥石流而言。如图11(b)所示,当初速度由0 m/s增大至23.8 m/s时,黏性泥石流冲击下前、后排基础所受冲击力峰值的比值由3.0降为1.1。

### 3.2.2 密度的影响

不考虑初始速度的影响,以黏度系数为 $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 稀性泥石流和黏度系数为 $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的黏性泥石流为例,不同密度泥石流对前排基础的冲击力时程曲线如图12所示,基础冲击力峰值出现的时间随着泥石流密度的变化而发生改变。由图13可知,无论是稀性或黏性泥石流,随着其密度的增加,尽管前排或后排基础所受的冲击力峰值并非单调递增,但前后排基础所受的冲击力峰值之和是逐渐增大的。

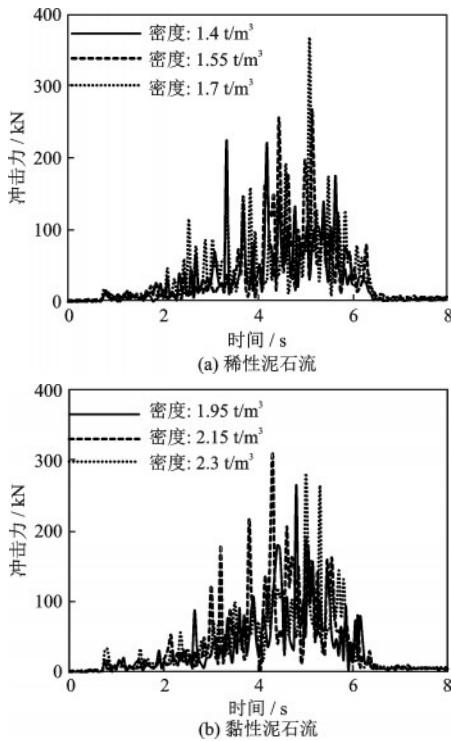


图12 不同密度泥石流下基础所受冲击力的时程曲线  
Fig.12 Debris flow induced impact force time histories on foundation involving different densities

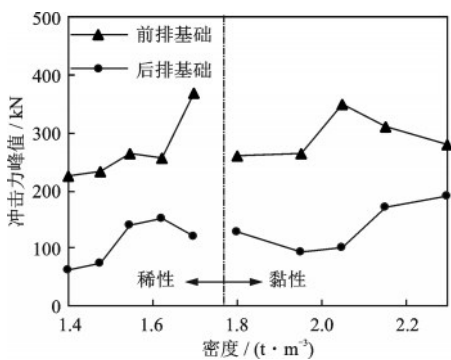


图13 不同密度泥石流下基础所受冲击力的峰值变化  
Fig.13 Debris flow induced peak impact forces on foundation involving different densities

### 3.2.3 黏度系数的影响

对于黏性泥石流来说,其黏度系数一般大于 $0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,浆体部分主要由富黏性物质组成,非浆体部分的粗颗粒物主要由粉砂和砾石等固体物质组成。不同黏度系数的泥石流主要对流体的流动状态和堆积特征产生影响。从图14所示的不同黏度系数条件下基础所受冲击力的时程曲线可以看出,冲击力峰值位置随着黏度系数的变化而改变。在其它因素不变的情况下,黏度系数对前排基础的冲击力峰值的影响大于后排基础。不同黏度系数泥石流作用下基础的冲击力峰值如图15所示。

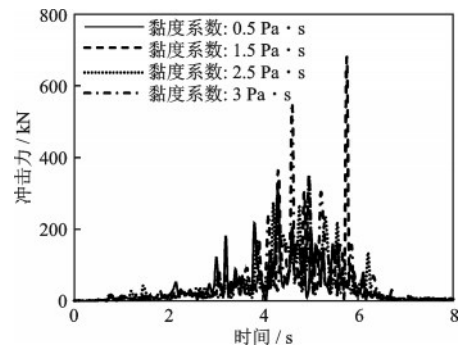


图14 不同黏度系数泥石流下基础所受冲击力的时程曲线  
Fig.14 Debris flow induced impact force time histories on foundation involving different viscosity coefficients

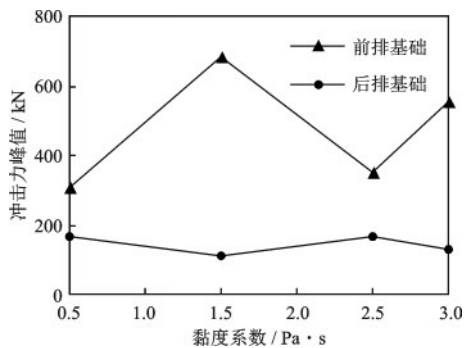


图15 不同黏度系数泥石流下基础所受冲击力的峰值变化  
Fig.15 Debris flow induced peak impact forces on foundation involving different viscosity coefficients

### 3.3 与半经验理论公式的对比

可将本文数值模拟的计算结果与常见的半经验理论公式的预测结果进行对比分析。

对于泥石流冲击力的计算,J.S.H.Kwan<sup>[30]</sup>基于水动力学模型提出了以下经验公式:

$$F_{\max} = \kappa \rho v^2 h w \sin \beta \quad (10)$$

式中, $\kappa$ 为动压力系数; $\rho$ 为泥石流密度; $v$ 为泥石流

前端速度;  $h$  为泥石流流深, 本文中为 0.2 m;  $w$  为泥石流流宽, 本文中为 12.5 m;  $\beta$  为基础与坡面之间的夹角, 本文中为  $85^\circ$ 。

王东坡等<sup>[11]</sup>通过试验发现不同类型泥石流的冲击时程曲线差别显著, 主要取决于泥石流的弗罗德常数  $Fr$ 。动压力系数  $\kappa$  是弗罗德常数 ( $Fr$ ) 的函数, 其关系式如下所示:

$$\kappa = aFr^b = a(v/\sqrt{gh})^b \quad (11)$$

式中,  $a$  和  $b$  为两个经验参数, 由弗罗德常数 ( $Fr$ ) 决定, 两者的取值可基于文献[31]中的方法获得;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

本文所有工况下基础的冲击力峰值与公式(10)预测值的对比如图 16 所示, 采用 Kwan 公式预测泥石流对基础冲击力的最大误差低于 30%, 可见两者的平均趋势较为吻合, 相关系数为 0.767。

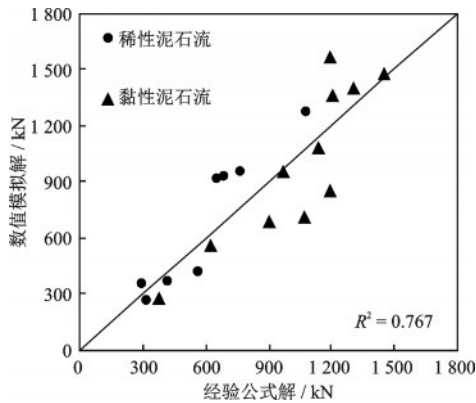


图 16 峰值冲击力计算值与经验公式(10)预测值的对比  
Fig.16 Comparison of the computed peak impact forces with the predicted ones by Equation (10)

另一方面, 根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》<sup>[32]</sup>推荐的铁二院公式, 泥石流对结构物的冲击力可由下式计算:

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (12)$$

式中,  $\delta$  为泥石流对结构物的冲击压力 (Pa);  $\lambda$  为建筑物形状系数, 对于输电塔基础可取 1.33;  $\gamma_c$  为泥石流重度 ( $\text{N/m}^3$ );  $V_c$  为泥石流断面平均流速 ( $\text{m/s}$ );  $\alpha$  为建筑物受力面与泥石流冲击压力方向夹角, 取  $85^\circ$ 。

公式(12)是基于冲、动量守恒原理进行修正的结果, 对冲击压力起决定性因素的泥石流断面平均流速, 在不同初始速度作用下泥石流冲击压力的数值解与公式(12)的预测解的对比如图 17 所示。稀

性和黏性泥石流在不同初始速度下的数值模拟值平均比理论计算值分别高约 17% 和 28%, 与王秀丽等<sup>[33]</sup>的发现基本一致。

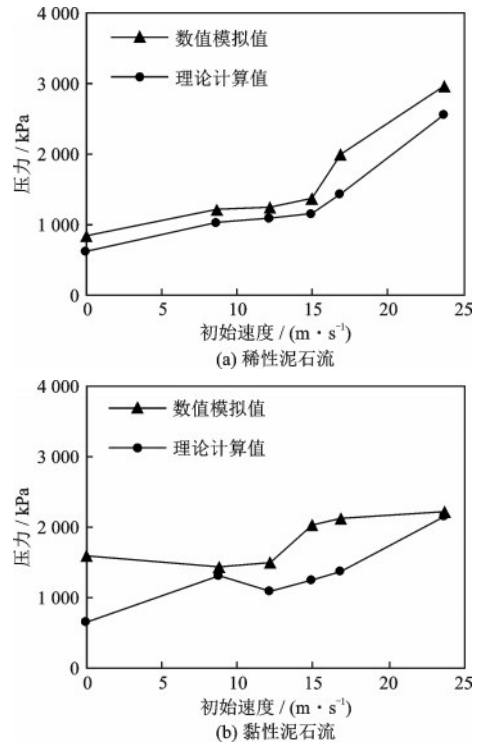


图 17 冲击压力计算值与经验公式(12)预测值的对比  
Fig.17 Comparison of the computed peak impact pressures with the predicted ones by Equation (12)

## 4 结论

采用 SPH-FEM 耦合的数值方法, 模拟了在泥石流冲击作用下输电塔基础的受力特性。分析比较了不同黏性、密度以及初始速度三种主要因素对泥石流冲击力的影响。所得主要结论如下:

(1) 泥石流的初始速度对基础冲击力的峰值影响显著: 随着泥石流初始速度的增加, 冲击力峰值逐渐增大, 在初始速度为 12~16 m/s 时, 基础所受冲击力峰值的增长明显最快, 随后趋于平稳。

(2) 前排基础比后排基础承受更大的冲击力; 不同初始速度的稀性和黏性泥石流冲击下, 前排基础所受冲击力峰值的平均值比后排基础分别高约 31.8% 和 55.3%; 随着初始速度的增加, 前排基础对后排基础的遮蔽效应呈减小趋势: 对于黏性泥石流, 当初始速度由 0 m/s 增加至 23.8 m/s 时, 前、后排基础所受冲击力峰值的比值由 3.0 降为 1.1。

(3)通过对比不同密度、黏度系数泥石流的冲击力时程曲线及速度云图可以看出,密度和黏度系数对泥石流的运动冲击过程形态影响显著。主要体现在:黏性泥石流在冲击基础之后,基础下游真空区会相对减小。

(4)数值模拟结果与半经验理论公式结果的对比表明:Kwan冲击力公式能较好地预测出基础所受泥石流冲击力的平均趋势,最大预测误差小于30%,而铁二院公式对于稀性和黏性泥石流冲击压力的预测值分别平均偏低约17%和28%,可见采用数值模拟方法计算泥石流冲击压力偏于保守。

### 参考文献:

[1] 刘希林,余承君,尚志海.中国泥石流滑坡灾害风险地图与空间格局研究[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(5):721-731.  
Liu X L, Yu C J, Shang Z H. Risk mapping and spatial pattern of debris flow and landslide hazards in China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(5): 721-731. (in Chinese)

[2] 李坤,赵俊三,林伊琳,等.基于RF和SVM模型的东川泥石流易发性评价研究[J].云南大学学报(自然科学版),2022,44(1):107-115.  
Li K, Zhao J S, Lin Y L, et al. Assessment of debris flow susceptibility in Dongchuan based on RF and SVM models[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(1): 107-115. (in Chinese)

[3] 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(8):1664-1669.  
He S M, Li X P, Wu Y. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1664-1669. (in Chinese)

[4] Bowman E T, Laue J, Imre B, et al. Experimental modelling of debris flow behaviour using a geotechnical centrifuge[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(7): 742-762.

[5] De Campos T M P, Galindo M S V. Evaluation of the viscosity of tropical soils for debris flow analysis: a new approach[J]. Géotechnique, 2016, 66(7): 533-545.

[6] 刘丽,陈洪凯.泥石流运动学研究现状及趋势[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(2):233-239.  
Liu L, Chen H K. Research status and trend about dynamics of debris flow[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(2): 233-239.

(in Chinese)

[7] 何晓英,唐红梅,陈洪凯.浆体黏度和级配颗粒组合条件下泥石流冲击特性模型试验[J].岩土工程学报,2014,36(5):977-982.  
He X Y, Tang H M, Chen H K. Experimental study on impacting characteristic of debris flow considering different slurry viscosities, solid phase ratios and grain diameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 977-982. (in Chinese)

[8] 朱志鹏,钱德玲,叶潇潇,等.泥石流作用下路基易损性模型试验研究[J].水土保持通报,2018,38(3):86-93.  
Zhu Z P, Qian D L, Ye X X, et al. Model test of subgrade vulnerability under debris flow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 86-93. (in Chinese)

[9] 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):3363-3372.  
Wang D P, Chen Z, He S M, et al. Physical model experiments of dynamic interaction between debris flow and bridge pier model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3363-3372. (in Chinese)

[10] 王东坡,张小梅.泥石流冲击弧形拦挡坝动力响应研究[J].岩土力学,2020,41(12):3851-3861.  
Wang D P, Zhang X M. Study on dynamic response of debris flow impact arc-shaped dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3851-3861. (in Chinese)

[11] 王东坡,赵军,张小梅,等.开口柔性防护网调控泥石流性能试验研究[J].岩土力学,2022,43(5):1237-1248.  
Wang D P, Zhao J, Zhang X M, et al. Experimental study of regulation performance of open flexible debris flow barriers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1237-1248. (in Chinese)

[12] 狄生奎,李健,张得强.泥石流冲击作用下框架结构的破坏机理[J].山地学报,2012,30(2):201-206.  
Di S K, Li J, Zhang D Q. Damage mechanism of frame structures impacted by debris flow [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(2): 201-206. (in Chinese)

[13] 王秀丽,吕志刚,李俊杰,等.新型泥石流拦挡坝的抗冲击性能[J].兰州理工大学学报,2015,41(4):135-138.  
Wang X L, Lyu Z G, Li J J, et al. Impact resistance of novel blocking dam of debris flow [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(4): 135-138. (in Chinese)

[14] 李培振,张波,杨善华.聚氨酯-钢夹层复合材料结构抗泥石流冲击性能研究[J].结构工程师,2019,35(3):91-98.  
Li P Z, Zhang B, Yang S H. Study on impact resistance of polyurethane steel sandwich composite structure against debris flow [J]. Structural Engineers, 2019,

- 35(3):91-98. (in Chinese)
- [15] 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 C, Yu Z X, Luo L R, 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. (in Chinese)
- [16] 黄云.泥石流冲击作用下桥墩动力响应研究[J].中外公路,2020,40(2):143-149.  
Huang Y. Research on dynamic response of bridge piers under impact of debris flow[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(2):143-149. (in Chinese)
- [17] 梁恒,李吉林,刘发明,等.基于光滑粒子流体动力学方法的泥石流冲击桥墩试验模拟[J].岩土力学,2021,42(5):1473-1484.  
Liang H, Li J L, Liu F M, et al. Simulation of debris flow impacting bridge pier tests based on smooth particle hydrodynamics method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(5):1473-1484. (in Chinese)
- [18] 丁鸿超,蒋宏业,赵新好,等.黏性泥石流对山区油气管道的冲击动力响应研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(2):277-285.  
Ding H C, Jiang H Y, Zhao X H, et al. Study on the impact dynamic response of viscous debris flow to oil and gas pipelines in mountainous areas [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2):277-285. (in Chinese)
- [19] 方君,王立忠,洪义,等.泥石流对山区风电场冲击防治研究[J].太阳能学报,2022,43(2):357-364.  
Fang J, Wang L Z, Hong Y, et al. Study on impact mitigation of debris flow to mountainous wind farms[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43 (2) : 357-364. (in Chinese)
- [20] 李培振,高宇,郭沫君.泥石流冲击力的研究现状[J].结构工程师,2015,31(1):200-206.  
Li P Z, Gao Y, Guo M J. Research status and development trend of debris-flow impact force [J]. Structural Engineers, 2015,31(1):200-206. (in Chinese)
- [21] 林文华,叶诚耿,王浩.山区输电塔边坡成灾模式及塔基失效类型[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):50-54.  
Lin W H, Ye C G, Wang H. Disaster mode of transmission tower slope in mountainous regions and failure type of tower foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(6) : 50-54. (in Chinese)
- [22] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. Astronomical Journal, 1977, 8 (12): 1013-1024.
- [23] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181(3): 375-389.
- [24] Liang H, He S, Liu W. Dynamic simulation of rockslide-debris flow based on an elastic-plastic framework using the SPH method [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79 (1) : 451-465.
- [25] Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 110(2) : 399-406.
- [26] Wang Z B, Chen R, Wang H, et al. An overview of smoothed particle hydrodynamics for simulating multi-phase flow [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(23/24): 9625-9655.
- [27] Chen C L. Bingham plastic or Bagnold's dilatant fluid as a rheological model of debris flow [C]// Proc. 3rd Int. Symp. on River Sedimentation. State of Mississippi: University of Mississippi, 1986: 1624-1636.
- [28] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.  
Kang Z C, Li C F, Ma A N, et al. Debris flow research in China [M]. Beijing: China Science Press, 2004. (in Chinese)
- [29] 黄林.基于SPH的边坡稳定性数值分析[D].成都:西南交通大学,2020.  
Huang L. Numerical analysis of slope stability based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020 (in Chinese)
- [30] Kwan J S H. Supplementary technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers: TN 2 /2012 [P]. The HKSA Government: Civil Engineering and Development Department, 2012.
- [31] 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.
- [32] 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T 0220—2006 [S].北京:中国标准出版社,2006.
- [33] 王秀丽,黄兆升.冲击荷载下泥石流拦挡坝动力响应分析[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):61-65.  
Wang X L, Huang Z S. Dynamic response analysis of the new debris flow block under impact load [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013,24(4):61-65. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)