

DOI: 10.11779/CJGE20230517

考虑透水效应的泥石流柔性防护网耦合分析方法

余志祥^{1,2,3}, 骆泓锦¹, 张丽君^{1,3}, 骆丽茹^{1,3}, 金云涛^{1,3}, 赵雷^{1,3}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学陆地交通地质灾害防治技术国家工程研究中心, 四川 成都 611756;

3. 西南交通大学防护结构研究中心, 四川 成都 610031)

摘要: 针对柔性防护网在黏性泥石流通过时的透水效应问题, 在柔性环连网等效薄膜有限单元(FEM)的基础上, 结合 S-ALE 和 Ergun 公式的欧拉-拉格朗日耦合算法, 提出了 Structured-ALE-FEM 耦合算法 (简称 S-A-F 方法), 实现了考虑透水效应的泥石流柔性防护网耦合分析。结合 USGS 的泥石流柔性防护模型试验, 开展了泥石流柔性防护全过程动力学分析, 并与试验结果进行了对比分析。研究表明: 提出的耦合方法可再现泥石流冲击、爬高及渗透堆积的全过程; 与试验相比, 泥石流堆积高度和堆积宽度的最大误差分别为 11.9%和 10.3%, 泥石流浆体通过量最大差量为 3.2%; 柔性防护网关键部件动力响应与试验相比, 右侧拉锚绳、左侧拉锚绳及网片最大变形量时程曲线误差分别为 3.2%, 16.4%, 14.4%。与不考虑阻水效应的两种理论算法相比, S-A-F 方法在泥石流冲击力峰值和泥石流浆体通过量准确度较同类其他方法提升了 4.69%和 17.50%。提出的 S-A-F 耦合方法可用于黏性泥石流柔性防护工程的设计计算。

关键词: 泥石流; 柔性防护网; S-ALE; 薄膜等效; 透水

中图分类号: TU449; X43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)08-1695-08

作者简介: 余志祥(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事防灾减灾与防护工程方面的教学与研究工作。E-mail: yzxzrq@home.swjtu.edu.cn。

Coupling analysis method for flexible debris flow barriers considering water blocking and permeability effects

YU Zhixiang^{1,2,3}, LUO Hongjin¹, ZHANG Lijun^{1,3}, LUO Liru^{1,3}, JIN Yuntao^{1,3}, ZHAO Lei^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Engineering Laboratory for

Prevention and Control of Geological Disasters in Land Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. Research Center for Protection Structures Against Natural Hazards, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To solve the dynamic effects of blocking and permeating water under the scouring effects of mudflow on flexible protection projects, a coupled S-ALE-FEM method considering the water blocking and permeability effects of mudflow flexible protection process is established. The equivalent thin film unit of the ring network considering the water-blocking-permeability effects is established according to the Euler-Lagrange coupling algorithm based on S-ALE and Ergun formula to realize the equivalent water-blocking-permeability quantification calculation of the dense curved beam-like metal ring network mudslide protection process. The kinetic analysis of the whole process of mudflow flexible protection is carried out in conjunction with the USGS mudflow flexible protection model tests, and the results are compared with the test ones. The study shows that the proposed coupled method can reproduce the full process inversion of debris flow impact, height climbing and infiltration accumulation. Compared with those of the tests, the maximum errors of debris flow accumulation height and accumulation width are 11.9% and 10.3%, respectively, and the maximum difference of debris flow slurry passage is 3.2%. For comparison between the tests and the dynamic response of key components of the flexible protection system, the maximum time-history errors of right side anchor rope, left side anchor rope and mesh are 3.2%, 16.4% and 14.4% respectively. Compared with those of the two theoretical algorithms not considering the water blocking effects, the accuracy of the calculated results of the peak debris flow impact force and the difference of debris flow slurry passage are improved by 4.69% and 17.50%, respectively. The S-A-F coupling method can solve the design and calculation challenges of mudflow flexible protection projects.

Key words: debris flow; flexible barrier; S-ALE; equivalent membrane; permeating water

基金项目: 四川省科技计划项目重点研发项目 (2022YFG0141); 交通运输行业重点科技项目 (2020-MS3-101); 国家重点研发计划项目 (2018YFC1505405)

收稿日期: 2023-06-07

0 引言

泥石流是由水和固体颗粒物混合而成的流态物质,常在山区发生,具有突发性,容易造成巨大的生命财产损失^[1]。中国西部地区由于地质环境因素影响,泥石流灾害频发^[2]。据统计,仅 2021 年就发生 374 起,是仅次于滑坡、崩塌的第三大地质灾害类型。柔性防护网是一种高效的泥石流防治技术(图 1),具有突出的大变形能力,对泥石流的初始冲击具有缓冲作用^[3];加之其安装灵活及环境影响小的特点,被大量应用于实际工程^[4-5]。泥石流被柔性防护网拦截后会发生透水现象,形成泄流,大大降低了防护网的负载作用,但也可能导致泄流物质形成二次灾害,因此,这对柔性防护网的设计提出了更高要求^[6],如何量化考虑泥石流防护的透水问题成为设计关键难题。



图 1 泥石流柔性防护网拦截泥石流

Fig. 1 Interception of debris flow by debris flow flexible barriers

国内外学者通过理论、试验及数值模拟对泥石流柔性防护开展了大量研究。在试验方面,美国地质调查局(USGS)开展了足尺试验^[7],完整呈现了柔性防护过程的“透水沉渣”现象;Wendeler 等^[8]通过缩尺试验研究了防护网的孔隙尺寸对泥石流物料的拦截率影响,进一步证明了防护网“透水沉渣”效应的重要影响。在理论研究方面,Armanini^[9]考虑透水效应,基于土压力系数及泥石流总沉积高度的流体静力法,近似实现了均匀泥石流对柔性防护网冲击力的计算;Hung 等^[10]提出了修正的水动力法,用于计算均匀泥石流对柔性防护网的冲击力;Tan 等^[11]在两相流模型上引入“透水率”参数,提出了考虑泥石流浆液通过度的简化冲击力计算方法。在数值方法方面,Denatale 等^[12]运用耦合的格子玻尔兹曼-离散元-有限元方法(LBM-DEM-FEM),通过格子玻尔兹曼方法模拟泥石流浆体、离散元方法模拟颗粒体和有限元方法模拟柔性防护网,但忽略了泥石流浆体与防护网的耦合作用;Liu 等^[13-14]使用光滑粒子流体动力学-有限元(SPH-FEM)方法模拟了泥石流与柔性防护网的相互作用,也仅考虑了泥石流浆体(SPH 粒子)的完全透过性,同样忽略了

泥石流浆体与防护网的耦合作用。柳春^[15]使用光滑粒子流体动力学-离散元-有限元(SPH-DEM-FEM)方法并引入虚拟膜单元考虑泥石流浆体和防护系统的耦合作用,但完全忽略了浆体的渗透性。综合来看,相关研究成果对泥石流柔性防护设计具有理论意义。但是,浆体裹挟粗大固体颗粒对柔性防护网的冲刷作用极其复杂,涉及复杂的流体-固体-结构耦合作用,完全考虑透水作用在理论上忽略了流体与结构的耦合作用,加上经验化的参数引入,这可能导致计算结果存在较大误差。为此,本文研究了考虑透水效应的泥石流与柔性防护网的耦合作用,提出了基于 S-ALE (Structured-Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 耦合分析方法。

S-ALE 方法的出现有效解决了大变形流体的计算效率难题,如王明振等^[16]使用 S-ALE 方法实现了飞机水上迫降的大变形流体数值模拟,汪春辉等^[17]运用 S-ALE 方法实现了极地冰区舰艇出水破冰的模拟。上述研究为泥石流大变形模拟提供了参考。结合 Jin 等^[18]提出的金属环网薄膜等效法,以及贾贺等^[19]对空气透过伞布的研究,可进一步整合发展出基于 ERGUN 公式^[20]的欧拉-拉格朗日流固耦合分析方法,用具有透水特征的膜单元等效梁杆状金属环网,解决杆状结构与泥石流的耦合计算难题,并同步考虑泥石流柔性防护的透水效应,该方法在本文中被定义为 S-ALE-FEM(后文简称 S-A-F)方法。本文进一步使用美国地质调查局(USGS)的试验进行了反演与验证,证明了方法的有效性。

1 计算方法

由于研究主旨着眼于解决泥石流与网孔状柔性防护系统耦合作用下的渗滤效应,故暂不考虑泥石流运动过程的能量损耗和运动扩大化现象而可能导致的误差。

1.1 泥石流浆体控制方程

S-ALE 算法兼有 Lagrange 算法和 Euler 算法的优点,适合于泥石流运动的描述,该算法的泥石流浆体控制方程(质量、动量及能量守恒)偏微分形式表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \\ \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} &= \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} &= \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j}, \\ \sigma_{ij} &= -p \delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ρ 为泥石流浆体密度; t 为时间; v_i 为材料速度; w_i 为泥石流 i 方向相对速度; $w_i = v_i - u$, u 为网格速度; x_i 为 i 向欧拉坐标; b_i 为单位体积力; x_j 为 j 向欧拉坐

标, $\sigma_{ij,j}$, σ_{ij} 为泥石流流的计算应力张量; μ 为动力黏度系数; $(v_{i,j} + v_{j,i})$ 为应变率偏量。

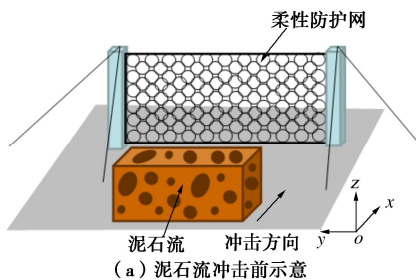
通过方程 (1) 可得到在以上限定条件下不同时刻质量、动量及能量守恒条件下泥石流浆体(S-ALE)的流动速度 v_f ($v_f = \sqrt{w_j^2 + w_i^2}$), 泥石流内能 E 。

1.2 防护网等效透水薄膜单元

为解决金属环网的透水薄膜等效问题, 首先需解决环网与薄膜的等效。基于 Jin 等^[18]的膜等效拉力带解析模型建立了柔性防护网透水膜等效模型图 2。其中, 图 2(a) 为泥石流冲击前示意图, 图 2(b) 为泥石流冲击柔性防护网示意, 图 2(c) 为透水阻水薄膜正交拉力带分区假定, 图 2(d) 为拉力带模型。基于 Jin 等^[18]的理论假定, 薄膜刚度主要来自张拉应力, 因此导致 I 区应力普遍较低 (图 2(c)), 故可忽略 I 区刚度贡献。柔性网受到外荷载作用时, 任一时刻拉力带由两条直线和一条半径为 R 的圆弧构成 (图 2(d)), 薄膜沿冲击方向位移为 L , 泥石流与薄膜沿冲击方向接触力为 F 。II 区长度为 l , 未受泥石流冲击时初始宽度为 d_1 , 薄膜等效厚度为 t_0 , 沿冲击水平面的投影距离为 h , 与冲击水平面夹角为 θ 。圆弧段弧长 L_r 与圆弧顶端到直线水平距离 h_0 可通过监测泥石流冲击柔性防护网不同时刻网片水平段变形量获得。设局部坐标系 y 轴沿 II 区拉力方向, x 轴为 II 区拉力带宽度方向, z 轴沿薄膜厚度方向。本构关系及等效厚度计算为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y &= \ln \left(\frac{2\sqrt{d_1^2 + (L - h_0)^2} + L_r}{d + 2d_1} \right), \\ \varepsilon_{ex} &= \varepsilon_{ex} = \left(\frac{2\sqrt{d_1^2 + (L - h_0)^2} + L_r}{d + 2d_1} \right)^{\frac{1}{2}} - 1, \\ \sigma_y &= \frac{F}{4\sin\theta(1 + \varepsilon_{ex})t_0(1 + \varepsilon_{ex})}, \\ t_0 &= \frac{m_n}{\rho_0}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: d 为 III 区未受泥石流冲击时的初始宽度, 基于 Jin 等^[18]的理论假定 $d_1 = d$; σ_y , ε_y 为等效薄膜沿 y 轴方向应力和应变; ε_{ex} , ε_{ex} 为 L 的函数; t_0 为等效薄膜厚度, m_n 为 n 圈规格环连网每平方质量; ρ_0 为环连网钢丝密度。



(a) 泥石流冲击前示意

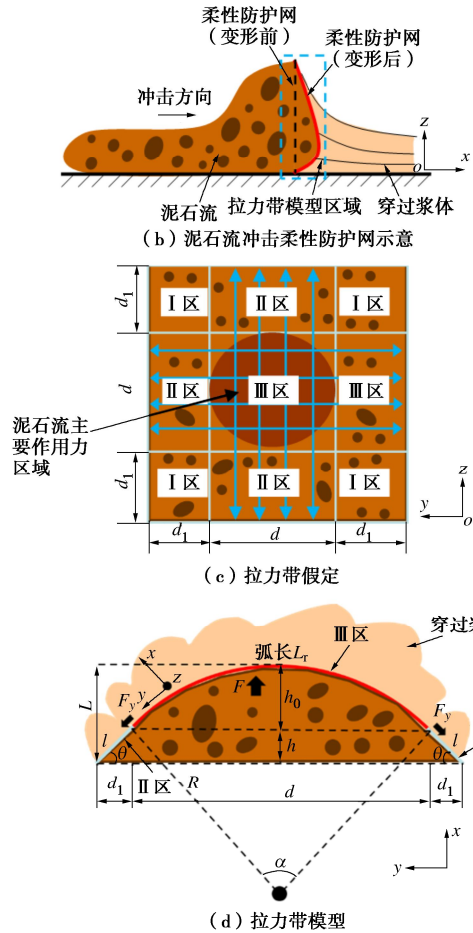


图 2 柔性防护网透水薄膜等效模型

Fig. 2 Equivalent model for water permeable membrane of flexible barriers

由于在锋前冲击过程中, 泥石流锋前冲击对柔性防护系统的动力作用影响极大, 故本文研究侧重于锋前初次冲击于柔性防护网系统的耦合作用, 并关注锋前冲击过程中薄膜单元的透水性。本文基于 Aquelet 等^[20]的多孔介质渗透压力理论计算方法, 设薄膜整体拦截面区域为 R^3 , 透水区域为 Ω_s , 由于需要考虑泥石流流柔性防护网整体的透水性, 故设 $\Omega_s = R^3$, 如图 3 所示。另外, Ω_s 区域透水性与空隙率 $\varepsilon(\Omega_s)$ 相关, 引入与薄膜空隙率相关的黏性阻力系数 $a(\mu, \varepsilon)$ 和惯性阻力系数 $b(\rho, \varepsilon)$ 来建立透水薄膜单元, 两系数计算表达式为

$$\left. \begin{aligned} a(\varepsilon, \mu) &= \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3}, \\ b(\rho, \varepsilon) &= \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3}, \\ \varepsilon(\Omega_s) &= \frac{S_1}{S} \quad (\Omega_s = R^3). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon(\Omega_s)$, S_1 和 S 分别为薄膜透水区域空隙率、空隙面积和整体面积; D_p 为多孔介质的当量直径。

为满足耦合计算合理性, 透水薄膜单元与 S-ALE 泥石流浆体单元大小比值不超过 2。

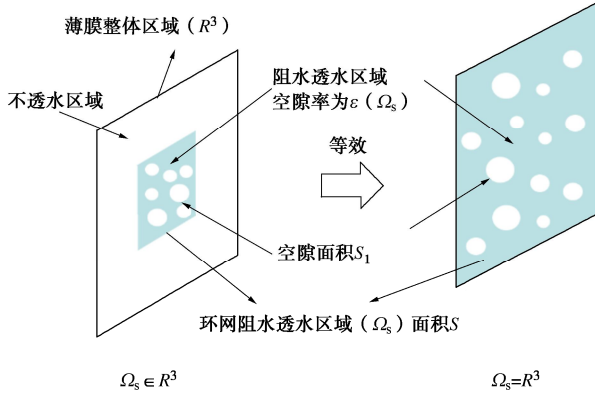


图3 透水薄膜单元等效示意

Fig. 3 Equivalent representation of water permeable membrane element

1.3 浆体-透水薄膜单元耦合方法 (S-A-F)

利用基于 Ergun 公式的欧拉-拉格朗日耦合方法来考虑 S-ALE 与 FEM 透水薄膜单元的相互耦合作用。该耦合算法通过主从节点算法来考虑 FEM 单元与 S-ALE 单元的相互作用, 将 FEM 单元节点视为从节点, S-ALE 单元内的流体被视为主节点, 耦合原理如图 4 所示。首先使用形函数从 S-ALE 单元的节点中插值求得该流体粒子的质量和速度, 其次该耦合算法会检查每一个运算时间步 S-ALE 单元是否穿透 FEM 透水薄膜单元表面, 穿透时, S-ALE-FEM 膜结构界面节点会产生耦合力。假设 S-ALE 单元与 FEM 膜单元之间的穿透深度矢量为 d , d^n 为时间 $t=t^n$ 时主节点相对从节点的穿透深度, n 为迭代次数, 穿透深度的迭代更新公式为

$$d^{n+1} = d^n + v_{\text{rel}}^{n+1/2} \Delta t \quad (4)$$

式中: $v_{\text{rel}}^{n+1/2} = v_s^{n+1/2} - v_f^{n+1/2}$, v_f 为式(1)计算得 S-ALE 主节点位置处速度, v_s 为 FEM 薄膜单元从节点位置处速度, 当 $d^n < 0$ 时, 耦合才会发生。

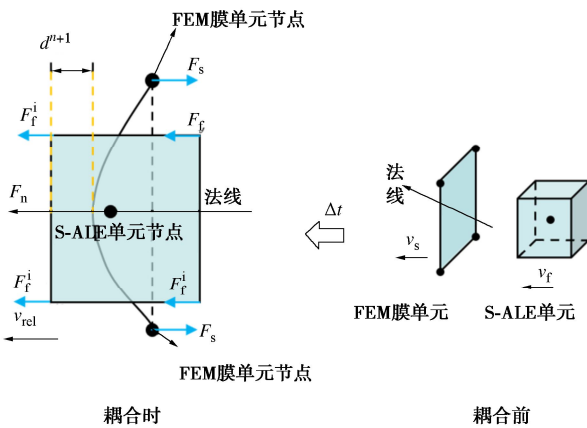


图4 S-A-F 耦合原理

Fig. 4 Coupling principle of S-A-F

FEM 膜单元与 S-ALE 单元法向耦合力采用 Ergun 公式计算:

$$F_n = \frac{dp}{dz} \times T_{\text{HKF}} \times S = -F_s = \sum_{i=1}^8 F_f^i \quad (5)$$

式中: F_n 为 FEM 膜单元与 S-ALE 单元的法向耦合力; T_{HKF} 为 FEM 单元的有效厚度因子, 取值范围为 $[0, 1]$, 假设为全厚度耦合, T_{HKF} 取为 1; F_s 为 FEM 单元耦合节点的接触力; F_f^i 为 S-ALE 单元节点基于形函数 N_i 分布到 S-ALE 单元每个节点上的接触力, 且满足 $F_f^i = N_i F_n (i=1, 2, 3, \dots, 8)$; \hat{z} 为沿透水薄膜单元表面法线方向的局部坐标系位置。

其沿法线方向的压力梯度 $\frac{dp}{dz}$ 计算为

$$\frac{dp}{dz} = a(\mu, \varepsilon) v_{\text{rel}} + b(\rho, \varepsilon) (v_{\text{rel}})^2 \quad (6)$$

式中: $a(\mu, \varepsilon)$ 和 $b(\rho, \varepsilon)$ 分别为黏性阻力系数和惯性阻力系数。

由于本文研究主要针对泥石流冲击柔性防护网的瞬态动力学行为, 基于文献[20]假设: 当流体以较高速度冲击膜结构时, 可将压力梯度微分方程描述为

$$\frac{dp}{dz} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v_{\text{rel}} + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} (v_{\text{rel}})^2 \quad (7)$$

S-A-F 耦合计算流程如图 5 所示。首先, 在每个时间步, 分别计算 S-ALE 单元和 FEM 透水薄膜单元的速度、位置和穿透深度 d^n ; 其次计算同一时刻两者的相对速度和穿透深度; 最后检查穿透深度是否小于 0, 如果满足小于 0, 则进行下一步处理, 计算 FEM 透水薄膜单元与 S-ALE 的耦合力, 否则, FEM 透水薄膜单元和 S-ALE 单元作为两个独立单元运算。在整个过程中需要更新 S-ALE 与 FEM 透水薄膜单元的加速度、运动位置和穿透深度 d^n 。

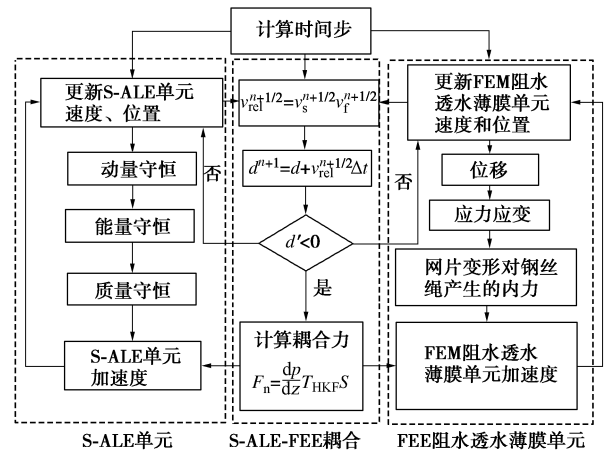


图5 S-A-F 耦合计算流程

Fig. 5 Coupled computing flow of S-A-F

2 计算方法验证

2.1 数值模型及参数设置

1996 年, Iverson 等^[7]在美国地质调查局 (USGS) 的俄勒冈州蓝河试验场开展了大规模黏性泥石流水槽试验, 以定量的方式测试了泥石流柔性防护动力响应。本文结合该试验的部分测试结果, 使用 LS-DYNA 对 S-A-F 方法的有效性进行了验证。为减少计算时间, 忽略了试验时的水槽段, 赋予泥石流初速度, 并设置为从底部混凝土挡板处开始流动, 保证其与柔性防护结构发生冲击时的速度与试验相同, 即泥石流初始冲击速度 $v=10\text{ m/s}$ 。

数值模型包含泥石流浆体、凹槽、堆积平台及柔性防护网。泥石流体积为 10 m^3 , 流动深度、宽度及长度分别为 $0.6, 2, 8.4\text{ m}$ 。凹槽出口与柔性防护网垂直距离为 3.5 m 。在柔性防护网的设置上, 运用 2.2 节理论分析, 将环连网等效为高 2.4 m , 宽 9.1 m 的透水膜, 如图 6 所示, 并在系统两边对称设置拉锚绳、支撑结构、上下主支撑绳及环形耗能器。

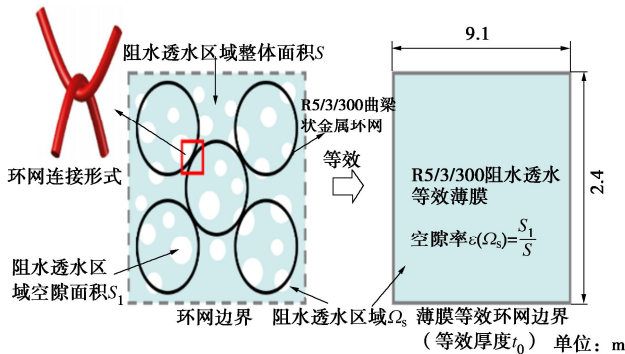


图 6 透水膜等效环网示意

Fig. 6 Representation of equivalent ring network of water permeable membrane

试验与数值模型对比见图 7, 数值模型中凹槽及堆积平面采用刚性壁面。透水薄膜等效环连网片使用 24 号材料, 并应用基于式 (2) 和 Jin 等^[18]所推导的 R5/3/300 薄膜等效本构模型, 薄膜单元划分为 2184 个 Belytschko-Tsay 单点积分的四边形壳单元^[18], 薄膜空隙率 $\epsilon(O_s)$ 由式 (3) 计算近似取值 0.4, 薄膜厚度由式(2)计算得为 0.42 mm , 支撑结构采用型号为 W8*48 的 H 型钢密度为 7900 kg/m^3 , 弹性模量为 206 MPa ; 环形耗能器采用仅受拉塑性弹簧单元进行模拟, 耗能器力-位移曲线参考文献[21]。凹槽密度为 7850 kg/m^3 , 钢丝绳 1×19 密度为 7900 kg/m^3 , 薄膜等效网片: 密度 ρ_0 为 7850 kg/m^3 , 厚度 t_0 为 0.42 mm 。

透水相关的 S-A-F 耦合参数基于 2.3 节计算, 本构模型采用 D-P 模型^[22], 与凹槽耦合设置为罚函数耦合, 其余参数如表 1 所示, 泥石流浆体密度为 1500 kg/m^3 。

2.2 模拟结果与对比分析

结合数值模拟结果与试验不同时刻的影像对比分析如图 8 所示, 发现数值模拟得到的泥石流冲击、爬升及堆积现象与物理试验基本一致。总体来看, 在 0.74 s 时, 泥石流与柔性环网接触并开始产生爬升现象, 底部平面开始产生堆积和阻滞 (图 8 (a) ~ (c))。在 1.4 s 时, 泥石流冲击柔性防护网达到最大爬升高度, 且泥石流开始产生冲击回淤现象图 (8 (d) ~ (f))。在 2.15 s 时, 泥石流冲击作用结束, 形成分布于薄膜底和膜后方的堆积体 (图 8 (g) ~ (i))。

对比分析了物理模型试验(test6)与数值模拟得到的泥石流冲击宽度、高度、泥石流浆体通过量及柔性防护网构件内力情况, 如图 9 所示。选择试验初始时

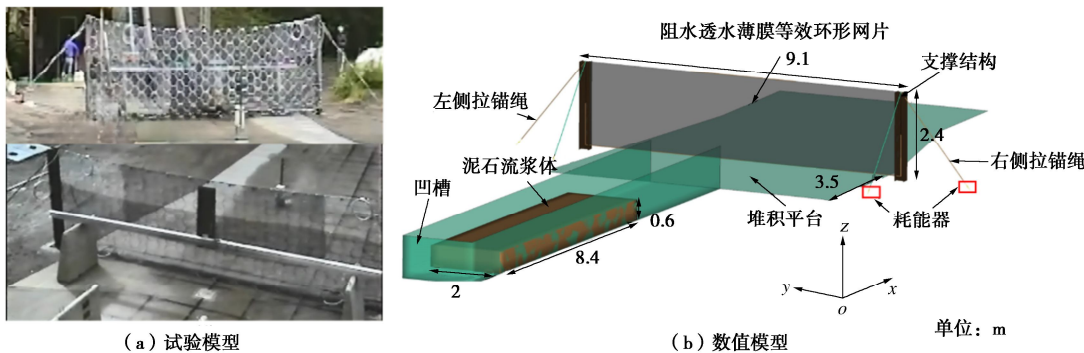


图 7 试验模型与数值模型对比

Fig. 7 Comparison of experimental and numerical models

表 1 泥石流及 S-A-F 耦合参数设置

Table 1Parameter setting of debris flow and S-A-F coupling

多孔介质的当量直径 D_p/m	黏聚力 c/kPa	泥石流初始冲击速度 $v_t^0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	动力黏度系数 μ	惯性阻力系数 $b(\rho,\epsilon)$	黏性阻力系数 $a(\mu,\epsilon)$	网片结构初速度 $v_s^0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0.002	1	10	0.001	1.23×10^7	2.10×10^5	0

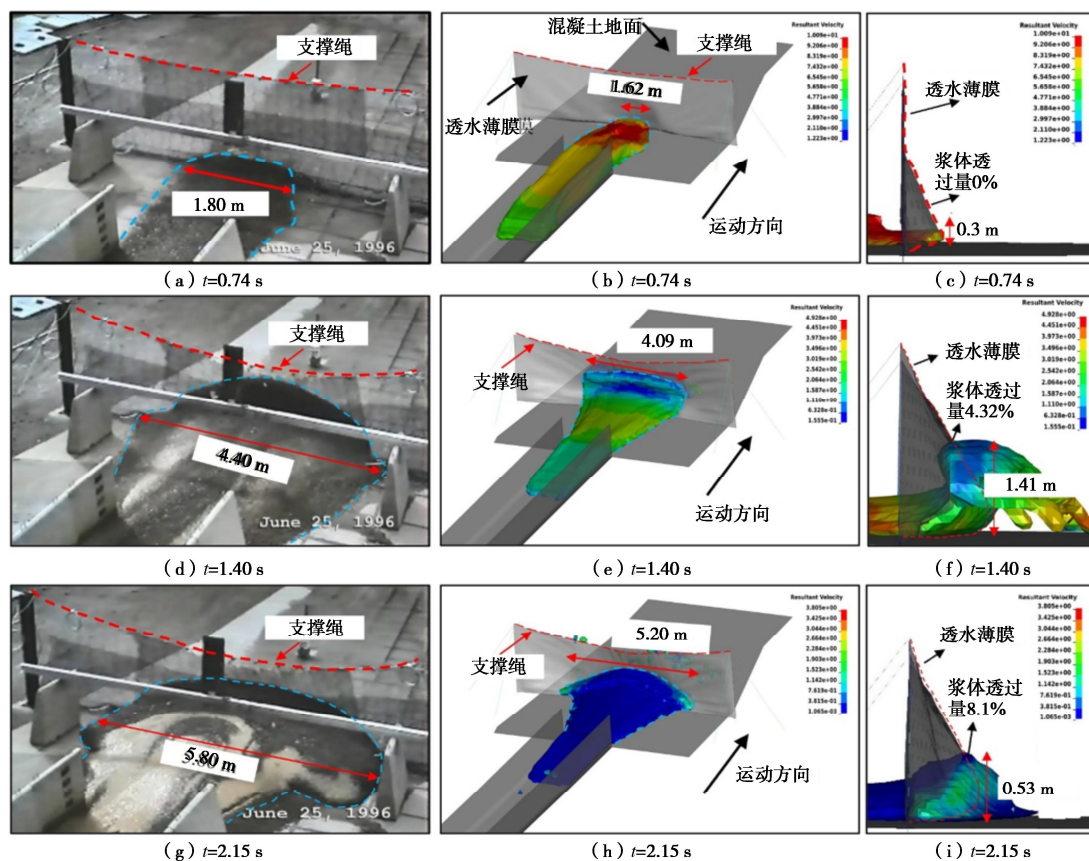
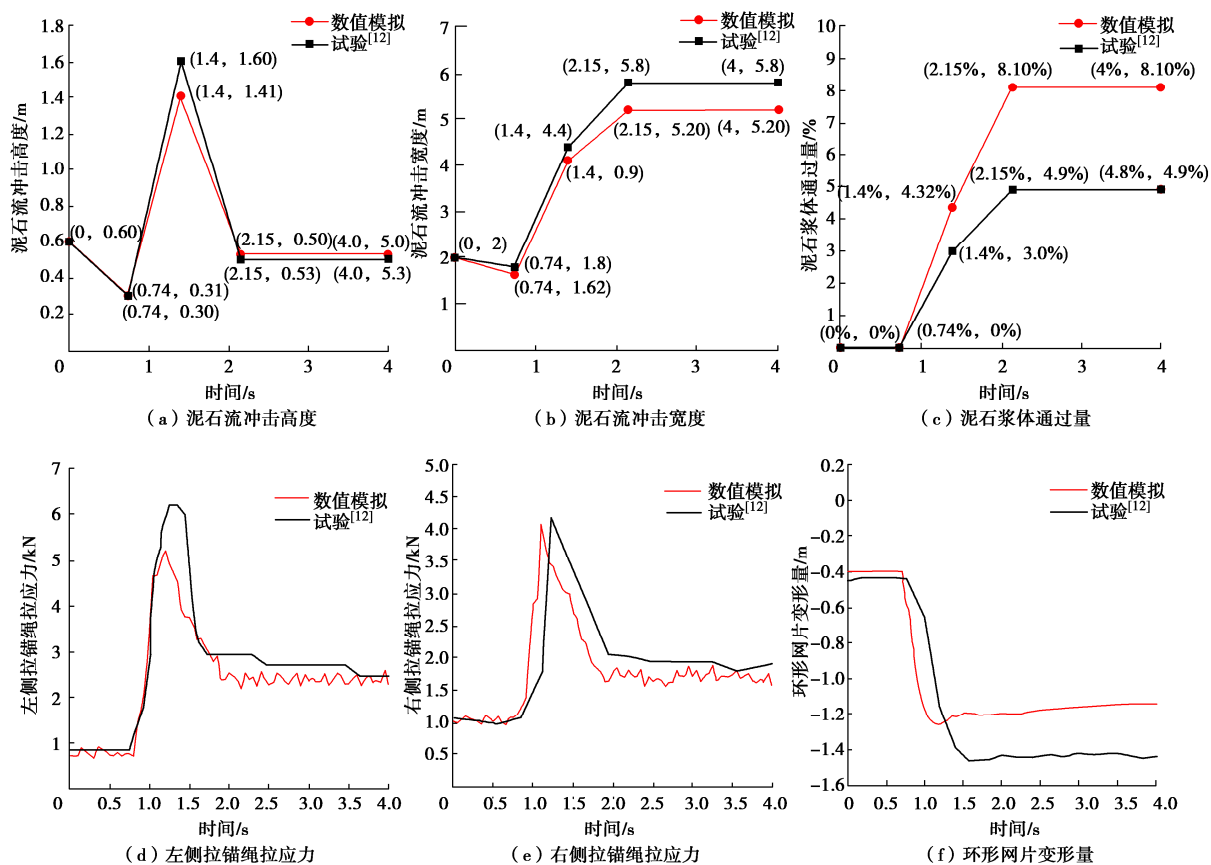
图8 数值模型与试验冲击过程对比^[23]Fig. 8 Comparison of numerical model process and experimental impact process^[23]

图9 试验与数值模型对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of experimental and numerical models

刻、图 8 所示代表性时刻及冲刷结束时刻, 对比分析泥石流爬升高度、冲刷宽度和浆体通过率, 结果如图 9 (a) ~ (c) 所示, 当 $t = 1.4\text{ s}$ 时, 泥石流冲击高度达到最大值, 试验及数值模拟值分别为 1.6, 1.41 m, 两者误差为 11.9%。当 $t = 2.15\text{ s}$ 时, 泥石流冲击宽度达到最大值, 试验及数值模拟值分别为 5.8, 5.2 m, 两者误差为 10.3%。泥石流从接触网片到快速增加随后平稳达到泥石流浆体通过量最大值用时 1.4 s, 当 $t = 2.15\text{ s}$ 时, 泥石流通过量达到峰值, 试验及数值模拟值分别为 4.9%和 8.10%, 两者误差为 3.2%。 $t = 2.15\text{ s}$ 后, 泥石流停止运动, 其冲刷宽度、爬高及通过量保持不变。

柔性防护网关键结构构件的内力及变形时程曲线对比如图 9 (d) ~ (f) 所示, 时程曲线总体吻合较好。试验及数值模拟对比显示, 在 $t = 1.4\text{ s}$ 时, 左侧拉锚绳拉应力分别为 6.21, 5.19 kN, 误差为 16.4%, 右侧拉锚绳拉应力分别为 4.21, 4.08 kN, 误差为 3.2%, 网片变形量 (变形方向延 x 轴负方向) 分别为 1.46, 1.25 m, 误差为 14.4%。

分析两者的误差, 笔者认为主要是数值模拟忽略了柔性防护网环连网表面附着布设的一层小孔六边形网^[7]所致, 这导致低估了柔性防护网的渗透阻力, 因此模拟结果相对试验值偏小。但是, 整体上而言各种误差可控, 最大误差不超过 16.4%。

结合试验结果, 本文还比较了本文 S-A-F 法与 Hungr 等^[10]和 Tan 等^[24]的计算结果见表 2。与试验结果的对比显示, Hungr 等^[10]和 Tan 等^[24]等计算得到的冲击力峰值的误差分别为 10.45%和 10.10%, 浆体通过量最大差值分别为 20.70%和 15.51%, 显然, 这是只考虑了柔性防护网的透水作用而未充分考虑阻水作用造成的。本文计算得到的冲击力峰值及浆体通过量的误差分别为 5.76%和 3.20%, 精度有明显提升。这证明了结合了薄膜阻水透水区域空隙率、空隙面积和整体面积假设的 S-A-F 耦合分析方法适用于泥石流柔性防护分析的有效性。由于本文的研究主旨着眼于解决泥石流与网孔状柔性防护系统耦合作用下的渗滤效应, 故本文暂不考虑泥石流运动过程的能量损耗和运动扩大化现象而可能导致的误差。

表 2 不同文献泥石流冲击力峰值及浆体通过量误差对比
Table 2 Comparison of peak mudflow impact force and slurry throughput error in different literature

数据来源	冲击力 峰值/kN	误差/ %	浆体最大通 过量/%	浆体通过量 最大差值/%
试验	81.09	—	4.90	—
本文	75.33	5.76	8.10	3.20
Hungr 等 ^[10]	72.90	10.10	25.60	20.70
Tan 等 ^[24]	72.62	10.45	20.41	15.51

3 结 论

本文在考虑柔性防护网透水效应的基础上, 针对泥石流柔性防护网进行了全过程数值模拟, 研究结果证明了 S-A-F 耦合分析方法在研究石流柔性防护透水效应问题上的有效性。通过对比数值模拟与试验结果, 得到以下 2 点结论。

(1)考虑了透水效应的 S-A-F 耦合方法能较好地还原泥石流冲击柔性防护网的冲击、爬升及堆积阻滞的全阶段物理现象, 在全过程中, 数值仿真与试验在最大堆积高度和堆积宽度的最大误差分别为 11.9%和 10.3%; 右侧、左侧拉锚绳最大拉应力及网片最大变形量误差分别为 3.2%, 16.4%, 14.4%, 总体误差可控, 即在考虑网片透水阻水效应的基础上, 较好地还原了泥石流的流动状态。

(2)与试验相比, S-A-F 耦合方法计算的泥石流峰值冲击力误差和泥石流浆体通过量差量值分别为 5.76%和 3.2%, 且误差远小于其他考虑泥石流柔性防护透水特征的理论计算方法计算值。

虽然本文未考虑块石对防护系统的堵塞现象及滑床物质参与是否会导致误差增加, 但该方法本身可考虑, 下一步可以考虑更多因素的影响, 做更深一步拓展研究。同时, 针对本文给出的 S-A-F 耦合分析方法, 仍需结合后续研究, 考虑更多边坡地貌及形状的影响因素, 提高其统计意义上的普适性。

参考文献:

[1] 朱颖彦, 潘军宇, 李朝月, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 71-83. (ZHU Yingyan, PAN Junyu, LI Chaoyue, et al. Glacier debris flow along China-Pakistan International Karakoram Highway (KKH)[J]. Mountain Research, 2022, 40(1):71-83. (in Chinese))

[2] 刘 波, 牛运华, 王 科, 等. 乌东德水电站白滩沟泥石流特性分析与防治措施[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 225-230. (LIU Bo, NIU Yunhua, WANG Ke, et al. Characteristic analysis and control measures for debris flow in Baitan Gully of Wudongde Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 225-230. (in Chinese))

[3] 刘成清, 许城杰, 陈 鑫, 等. 泥石流柔性防护网结构破坏原因分析与设计对策[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5): 6-11. (LIU Chenqing, XU Chenjie, CHENG Xin, et al. Failure cause analysis and countermeasures design of flexible debris flow protection system[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(5): 6-11. (in Chinese))

- [4] 肖思友, 苏立君, 姜元俊. 碎屑流冲击柔性网的离散元仿真研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 526-533. (XIAO Siyou, SU Lijun, JIANG Yuanjun. Numerical investigation on flexible barriers impacted by dry granular flows using DEM modeling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 526-533(in Chinese))
- [5] SZE H Y, HO K S, KOO C H, et al. Design of flexible barriers against sizeable landslides in Hong Kong[J]. HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers, 2018, **25**(2): 115-128.
- [6] 韩 玫. 汶川震区“宽缓”与“窄陡”沟道型泥石流致灾机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (HAN Mei. Hazard Mechanism Research of Wide-Gentle and Narrow-Steep Channels Debris Flow in Wenchuan Earthquake Region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [7] IVERSON R M. The physics of debris flows[J]. Reviews of Geophysics, 1997, **35**(3): 245-296.
- [8] WENDELER C, VOLKWEIN A. Laboratory tests for the optimization of mesh size for flexible debris-flow barriers[J]. Natural Hazard Earth Sys, 2015, **15**(12): 2597-2604.
- [9] ARMANINI A. On the Dynamic Impact of Debris Flows[M]. Berlin: Springer, 1997.
- [10] HUNGR O, MORGAN G C, KELLERHALS R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **21**(4): 663-677.
- [11] TAN D Y, YIN J H, QIN J Q, et al. Experimental study on impact and deposition behaviors of multiple surges of channelized debris flow on a flexible barrier[J]. Landslides, 2020, **17**(7): 1577-1589.
- [12] DENATALE J S, IVERSON R M, MAJOR J J, et al. Experimental Testing of Flexible Barriers for Containment of Debris Flows[M]. Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey, 1999.
- [13] LIU C, YU Z X, ZHAO S C. Quantifying the impact of a debris avalanche against a flexible barrier by coupled DEM-FEM analyses[J]. Landslides, 2020, **17**(1): 33-47.
- [14] LIU C, YU Z X, ZHAO S C. A coupled SPH-DEM-FEM model for fluid-particle-structure interaction and a case study of Wenjia gully debris flow impact estimation[J]. Landslides, 2021, **18**(7): 2403-2425.
- [15] 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 Chun. Theory and Method of Discrete analysis for Flexible Protective Structure against Geological Hazard on Shallow Slope[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [16] 王明振, 曹东风, 吴 彬, 等. 基于 S-ALE 流固耦合方法的飞机水上迫降动力学数值分析[J]. 重庆大学学报, 2020, **43**(6): 21-29. (WANG Mingzhen, CAO Dongfeng, WU Bin, et al. Numerical analysis of aircraft dynamic behavior in ditching based on S-ALE fluid-structure interaction method[J]. Journal of Chongqing University, 2020, **43**(6): 21-29. (in Chinese))
- [17] 汪春辉, 王嘉安, 王 超, 等. 基于 S-ALE 方法的圆柱体垂直出水破冰研究[J]. 力学学报, 2021, **53**(11): 3110-3123. (WANG Chunhui, WANG Jia'an, WANG Chao, et al. Research on vertical movement of cylindrical structure out of water and breaking through ice layer based on S-ALE method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, **53**(11): 3110-3123. (in Chinese))
- [18] JIN Y T, YU Z X, LUO L R, et al. A membrane e-equivalent method to reproduce the macroscopic mechanical responses of steel wire-ring nets under rockfall impact[J]. Thin-walled Structures, 2021, **167**: 108227.
- [19] 贾 贺, 荣 伟, 陈国良. 基于 LS-DYNA 的降落伞伞衣织物透气性参数仿真验证[J]. 航天返回与遥感, 2009, **30**(1): 15-20. (JIA He, RONG Wei, CHENG Guoliang. The use of LS-DYNA to simulate the permeability parameters of the parachute canopy[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2009, **30**(1): 15-20. (in Chinese))
- [20] AQUELET N, WANG J. Porous parachute modelling with an Euler-Lagrange coupling[J]. European Journal of Computational Mechanics, 2007, **16**(3/4): 385-399.
- [21] HALLGUIST J O. LS-DYNA-3D Theoretical Manual[M]. Pittsburgh: Livermore Software Technology Co., 1991: 1-11.
- [22] ZHAO L, YU Z X, HE J W, et al. Coupled numerical simulation of a flexible barrier impacted by debris flow with boulders in front[J]. Landslides, 2020, **17**(12): 2723-2736.
- [23] USGS Debris Flow Impact on Cable Net Mostly Saturated Sand/Gravel Mix[DB/OL]. <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1315/videos/1996/06-25-1996.mp4>, 1996-06-25/2023-09-06.
- [24] TAN D Y, YIN J H, FENG W Q, et al. New Simple Method for calculating impact force on flexible barrier considering partial muddy debris flow passing through[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(9).