

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202001036

泥石流柔性防护系统耦合作用数值模拟*

赵雷, 张丽君, 余志祥, 齐欣, 许浒

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 柔性防护系统近年来被广泛应用于交通沿线地质灾害的防治,但目前的相关研究主要集中在落石冲击作用下的力学响应,而遭受泥石流冲击作用的相关研究较少。泥石流与柔性防护系统的相互作用包括泥石流运动和柔性防护系统冲击大变形两个复杂的力学过程,目前尚无有效的耦合计算方法。为此,基于LS-DYNA程序,采用ALE方法,利用Drucker-Prager模型模拟泥石流的运动,并通过流固耦合算法,建立了考虑泥石流与柔性防护系统相互作用耦合计算方法。通过与既有野外足尺试验数据对比,包括泥石流流经沟槽不同位置时的速度、流深以及柔性防护系统钢丝绳内力、变形,验证了耦合计算方法的有效性。在此基础上,进一步研究了泥石流冲击作用下,冲击能量的平衡转换关系,结果表明:柔性防护系统消耗的能量占泥石流冲击总动能的比例不到25%,将近60%冲击能量转换为泥石流内能,这进一步说明了采用耦合方法进行泥石流柔性防护系统分析与设计的必要性。

关键词: 泥石流; 柔性防护系统; ALE; 耦合作用; 数值模拟

中图分类号: X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0606-08

Coupled Numerical Simulation of Flexible Debris Flow Barrier

ZHAO Lei, ZHANG Lijun, YU Zhixiang, QI Xin, XU Hu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In recent years, flexible barriers have been widely used in the prevention and control of geological disasters along railways, but the researches are mainly focused on the impact of rockfall, and few related studies focus on the impact of debris flow. The interaction between debris flow and flexible barrier includes two complex mechanical processes: debris movement and large deformation of the flexible barrier. At present, there is no effective coupled numerical simulation method. Therefore, in this paper, a coupled method to simulate the interaction between debris flow and the flexible barrier is established based on ALE method using LS-DYNA. In this method, Drucker-Prager model is adopted to describe the movement of debris flow. Compared with the existing full-scale test, including the flow velocity and flow depth of debris flow, as well as the internal force and deformation of flexible barrier, the validity of the coupling method is verified. Then, the transformation of the impact energy of debris flow is further studied. The results show that only 25% of the impact energy of the debris was dissipated by the flexible barrier, and there was about 60% of the impact energy transferred to the internal energy and dissipated by the debris flow itself. The results further explain the necessity to analyze and design flexible debris barriers by the coupling method.

* 收稿日期:2020-01-31;修回日期:2020-06-28

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1505405)、国家自然科学基金(51678504)、四川省应用基础研究重点资助项目(2018JY0029, 2019YJ0221)资助

作者简介:赵雷(1990—),男,讲师,博士。主要从事防灾减灾与防护工程研究。E-mail: zhaolei@my.swjtu.edu.cn

Keywords: debris flow; flexible barrier; ALE; coupled interaction; numerical simulation

引言

我国地形复杂、山地面积大,滑坡、泥石流等地质灾害频发。尤其是西部地区,岩体松散、降雨频繁、地震频发,特别是5·12汶川特大地震的发生,使得泥石流灾害进一步加剧^[1],对交通基础设施的正常运营以及人民生命财产安全造成严重威胁^[2]。目前,以浆砌石、混凝土等为主要材料的刚性拦挡结构是应用最为广泛的泥石流工程防治措施^[3],但其刚度大、变形能力弱且透水性差使其难以快速释放泥石流巨大的浆体压力和承受大块石的强大冲击力,实际工程中破损较为严重^[4-6]。泥石流柔性防护系统(图1)具有显著的柔性特征及“滤水沉渣”的特性,大大降低其所遭受的冲击力,且同时具有安装便捷、造价低、环境协调性好、易维护等特点,近年来快速获得泥石流灾害防治专家的青睐,实际工程中的应用越来越多^[7-9]。



图1 泥石流柔性防护系统^[8]

Fig.1 Flexible debris flow barrier

在试验研究方面,美国内政部地质调查局率先组织开展了6组不同配置泥石流柔性防护系统足尺冲击试验^[10];随后,瑞士联邦森林、雪与景观研究所^[11]及意大利帕尔马大学^[12]的相关学者先后进行了不同系统配置、不同结构形式的足尺试验,均验证了泥石流柔性防护系统优越的防护能力,并记录了关键部件的内力时程,为后续数值分析的校验提供了数据支撑。C.Wendeler等^[13]采用水槽模型试验,研究了网片尺寸对系统防护性能的影响;D.Song等^[14-15]采用离心机试验设备,开展了不同颗粒尺寸、不同柔性防护系统刚度的缩尺模型冲击试验,并对比了相同冲击条件下柔性防护系统与刚性防护系统能量耗散关系、冲击响应的差异;D.Y.Tan

等^[16]采用大比例尺模型试验,研究了柔性防护系统在多道泥石流连续冲击作用下的力学响应以及泥石流的沉积作用,通过引入“穿透率”参数,提出了一种考虑泥石流穿透效应的冲击力计算方法。

在数值计算方面,A.Leonardi等^[17]将柔性防护系统被简化为膜单元,建立了基于FEM-DEM-LBM的耦合计算模型;K.S.Lee等^[18]基于Abaqus计算平台,将泥石流简化为刚性球体,反演了缩尺模型试验;X.Y.Li等^[19]采用离散单元法模拟柔性防护系统,建立了基于计算流体动力学与离散单元法耦合的泥石流柔性防护系统计算方法;J.S.H.Kwan等^[20]基于LS-DYNA平台,通过流固耦合的方式建立了泥石流柔性防护系统耦合计算模型,并与试验结果进行了对比,验证了模型有效性。

综上所述,目前针对泥石流柔性防护系统的相关研究主要由海外相关学者所开展,国内相关研究非常少见,个别文献集中在具体工程的探讨性应用^[7,21-22]。可靠计算分析方法等基础性研究的缺失也导致国内工程实践中泥石流柔性防护系统的性能难以实现预期的性能目标,破坏较为严重^[23]。

针对泥石流柔性防护系统的计算分析,香港率先发布了泥石流柔性防护系统设计建议^[24],明确指出应在泥石流与柔性防护系统耦合作用方面进行更深入研究。欧盟于2016年颁布的泥石流柔性防护系统认证评估文件^[25]中也指出采用流固耦合数值计算直接考虑泥石流与柔性防护系统的相互作用是有效方式之一。

鉴于LS-DYNA在非线性显示动力求解方面的突出优势,丰富的材料本构模型以及在落石柔性防护系统^[26-28]研究中的成功应用,本文基于该程序,采用ALE方法,利用Drucker-Prager模型模拟泥石流流动,并通过流固耦合算法,建立了考虑泥石流与柔性防护系统相互作用的耦合计算方法。通过与既有野外足尺试验数据对比,验证了耦合计算方法的有效性。在此基础上,进一步研究了泥石流冲击作用下,冲击能量的平衡转换关系。

1 耦合计算方法

泥石流与柔性防护系统的耦合作用模拟方法涉及到泥石流模拟方法、柔性防护系统模拟方法与

耦合计算方法三大部分,下文针对每一部分进行详细介绍。

1.1 泥石流模拟

鉴于基于弹塑性 Drucker-Prager (D-P) 屈服准则的连续介质模型在泥石流水槽模型试验及实际灾害的反演分析中均获得较好的效果^[29],本文采用该模型描述泥石流自身的流变性,其表达式为:

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = \sqrt{J_2} - aI_1 - k = 0 \quad (1)$$

式中, a 、 k 为与泥石流黏聚力 c 和内摩擦角 φ 相关的常数; I_1 为应力张量的第一不变量, J_2 为应力张量的第二不变量。 I_1 、 J_2 的表达式分别为:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (3)$$

根据偏平面上 D-P 准则与 Mohr-Coulomb 准则的相关位置关系,一般分为外角外接圆、内角外接圆、内切圆等。本文采用内角外接圆模型,其中常数 a 、 k 的取值分别为:

$$a = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin\varphi)} \quad (4)$$

$$k = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin\varphi)} \quad (5)$$

ALE 方法中物质可以在网格之间相互流动,同时网格自身也可在计算过程中适当调整位置,网格不致出现严重的畸变,非常适用于大变形模拟。本文采用 ALE 算法进行泥石流运动模拟,捕捉泥石流的大变形特征。为节省计算消耗,泥石流沟槽采用刚性壳单元进行模拟,泥石流与沟槽间通过接触模型保证泥石流沿沟槽运动,并引入库伦摩擦,考虑摩擦耗能。同时,泥石流物质源首先通过挡板限制在其初始位置,在 2 s 时间内重力加速度从 0 施加到 9.8 m/s^2 ,完成了重力初始化后,挡板打开,泥石流在自重作用下开始运动。

1.2 柔性防护系统模拟

泥石流柔性防护系统大变形特征主要来源于耗能器的弹塑性大变形、网片沿支撑绳的大滑移以及支撑绳沿柱端的大滑移等,对大变形、大滑移的有效模拟同时也为柔性防护系统数值计算的难点所在,也是能否对其力学性能进行有效模拟的关键。

1.2.1 耗能器

采用仅受拉塑性弹簧单元进行模拟,同时根据耗能器力学特征,采用多段线性力-位移关系进行描述,如图 2 所示。

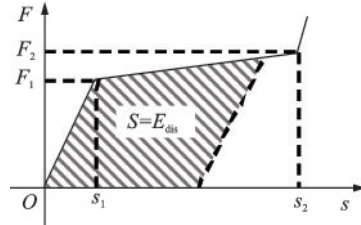


图 2 耗能器力-位移曲线

Fig.2 F-D curve of energy dissipating device

注: F_1 和 s_1 分别为耗能器的启动力及启动时的弹性变形量; F_2 和 s_2 分别为耗能器最大的工作拉力及最大的变形量; 阴影面积 S 则为能量耗散量

1.2.2 网片沿支撑绳滑移

柔性防护系统中,网片通常采用套结于支撑绳或采用卸扣与支撑绳相连的方式,受力时均会沿支撑绳发生大滑移运动^[26,30],起到缓冲作用。本文采用引导索接触算法 (*Contact_Guide_Cable), 有效实现网环沿支撑绳的定向滑移。

1.2.3 支撑绳沿柱端滑移

采用滑轮模型实现了支撑绳沿柱端的滑移,其力学原理如图 3 所示。初始时,单元 1 和单元 2 的公共节点与滑轮点保持一致,当单元 2 所受拉力 T_2 大于单元 1 所受拉力 T_1 时,单元 1 通过滑轮往单元 2 方向滑移,同时单元 1、2 均进行网格重划分,公共节点始终保持在滑轮位置,直至单元 1 完全滑移通过滑轮。

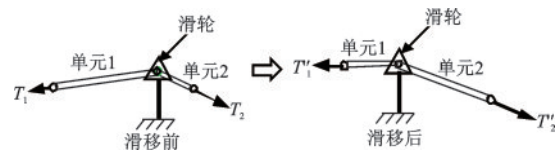


图 3 滑轮单元示意

Fig.3 Schematic diagram of the pulley element

此外,钢柱采用梁单元进行模拟,采用理想弹塑性本构模型,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,失效应变为 0.25;钢丝绳及网片均采用索单元进行模拟,采用双线性弹塑性本构模型,弹性模量分别为 150 GPa 和 150 MPa,泊松比为 0.3,屈服应力为 1 770 MPa,失效应变为 0.06^[30-31]。

1.3 耦合计算

由于泥石流采用ALE方法进行模拟,而柔性防护结构采用的是拉格朗日方法进行模拟,要实现两者耦合,则需通过流固耦合算法进行。本文采用名为*Constrained_Lagrange_in_Solid流固耦合关键字中基于罚函数的耦合算法^[32]实现泥石流与柔性防护结构的耦合作用。由于该算法尚未能实现ALE与一维索单元的耦合,模型中在网片表面覆盖了虚拟膜

单元。其中,膜单元采用空材料模型,无刚度,仅传递耦合作用力。需要说明的是,由于引入的膜单元不具有渗透性,未能实现网片“滤水沉渣”的特性,与现实情况存在一定差异。但该方法一方面是在泥石流柔性防护系统耦合作用数值模拟方面进行的有益尝试;另一方面,该方法中柔性防护系统内力计算结果偏保守,用于设计时能满足安全需求。

综上所述,泥石流柔性防护系统耦合作用数值模拟方法如图4所示。

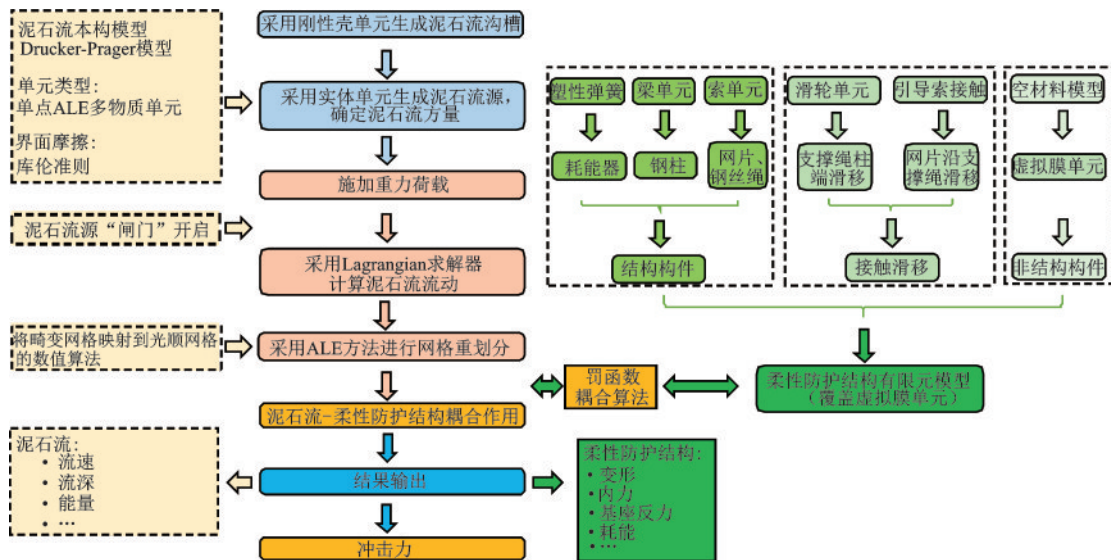


图4 耦合作用数值模拟方法

Fig.4 Coupled numerical simulation method

2 模型验证与分析

2.1 模型简介

选用瑞士联邦森林、雪和景观研究所于2010年所完成的野外足尺冲击试验数据资料进行反演分析^[11,33-34],试验沟槽长41 m,宽8 m,坡度为30°,如图5所示。每次有50 m³泥石流从顶部释放,共释放4次,本文仅对第一次试验进行模拟。试验过程中,采用高速摄像机记录泥石流流动过程,并通过运动分析得到特定位置(测点1、2、3)处的流速。通过激光位移传感器记录特定位置(测点4、5)泥石流深度,并通过流经不同位置传感器间距的时间差,再次得到泥石流的流速,同时,通过拉力传感器记录柔性防护系统绳索的内力时程。

泥石流密度为实测值,剪切模量及体积模量参考既有文献取值,内摩擦角及泥石流与沟槽的摩擦

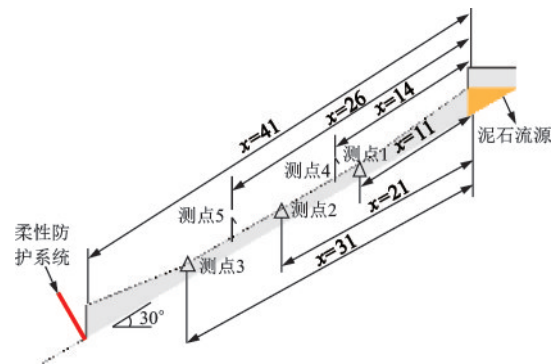


图5 沟槽示意及测点布置

Fig.5 Flume sketch and measuring point layout

系数通过试错的方式确定,相关参数见表1。

柔性防护系统由瑞士布鲁克生产,型号为SL-150,试验模型高3.5 m,长15 m,3跨,相关配置见表2,其中单个耗能器的启动力为50 kN,弹性伸长量为50 mm,最大工作拉力为60 kN,最大伸长量为1 100 mm,有限元模型如图6所示。

表1 泥石流模拟相关参数

相关参数	参数取值	备注
密度, ρ	2 085 kg/m ³	试验测试值
剪切模量, G	500 kPa	既有文献 ^[23]
体积模型, K	1 000 kPa	既有文献 ^[23]
黏聚力, c	2 kPa	反复试错
内摩擦角, φ_i	15°	反复试错
摩擦系数, μ	0.4	反复试错

表2 柔性防护系统配置

构件名称	型号	耗能器
钢柱	HEB 180	—
网片	SPIDER S4-130	—
上支撑绳	φ22	2-GS 8002
下支撑绳	φ22	2-GS 8002
拉锚绳	φ22	1-GS 8002
端支撑绳	φ22	—

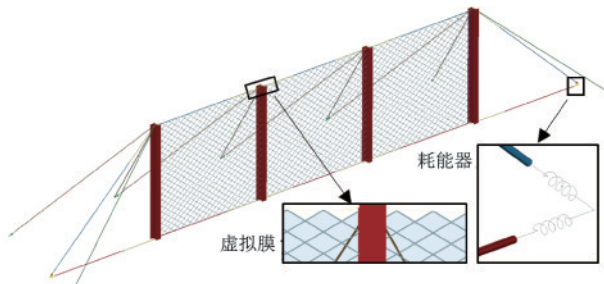


图6 柔性防护结构有限元模型
Fig.6 FEM model of the flexible barrier

2.2 模型验证

2.2.1 泥石流流动特征

泥石流流经不同监测点位置时的流速如表3所示。由表3可知,仿真结果与试验结果整体吻合较好。差异主要体现在泥石流运动的早期阶段,在前11 m范围内,误差达到25%;随后,随着泥石流流动,差异逐渐减少,在#1-#2测点区间,误差降为12%;在#4-#5测点区间,误差降为8%;随后在#2-#3区间误差进一步下降到1%。

泥石流流经监测点#4、#5时流深的对比结果见表4,泥石流形态如图7所示。由图7可知,由于摩擦作用,泥石流呈典型的前端外凸,末端凹陷的形态特征;当流经#4测点时,流深试验值为0.46 m,仿真计算结果为0.44 m,误差为4%;流经#5测点时,流

表3 泥石流流速对比

测点	x/m	Δx	时间 / s		平均速度 / (m·s ⁻¹)				
			试验 Δt_t	仿真 Δt_s	试验	仿真	误差		
0	11	0	1.54	2	2.08	7.1	5.29	-25%	
#1	11	10	1.54	4.08	1.14	7.8	8.77	12%	
#2	21	10	2.82	1.28	5.22	0.99	10.2	10.1	-1%
#3	31	10	3.80	0.98	6.21	1.29	8.6	9.3	8%
#4	14	12	6.93	1.39	4.44	1.29	8.6	9.3	8%
#5	26	12	8.32	5.73					

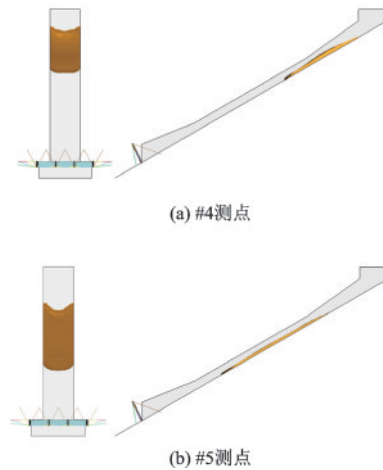


图7 泥石流形态
Fig.7 Shape of the debris flow

表4 泥石流流深对比

测点	试验 / m	仿真 / m	误差
#4	0.46	0.44	4%
#5	0.4	0.37	8%

深试验值为0.4 m,仿真计算结果为0.37 m,误差为8%。虽然随着泥石流流动,误差有所增大,但整体而言吻合较好。此外,还可通过加密网格尺寸、调整模型参数进一步提高仿真精度。

2.2.2 柔性防护系统力学特征

泥石流与柔性防护系统冲击作用过程中典型时刻的耦合作用状态如图8所示,泥石流被截停后柔性防护系统变形的计算结果与试验结果的对比如图9所示。由图9可知,数值模拟再现了泥石流与柔性防护系统耦合作用过程中所经历的初始碰撞、爬升、翻涌、下落直至全部堆积等运动过程。从初始碰撞至稳定堆积状态的耦合作用过程共历时约4.0 s,试验历时约为5.0 s,稳定状态下柔性防护

系统的最大变形计算值约为 1.7 m, 试验值约为 1.6 m。其差异主要来源于数值模型中所采用的虚拟膜单元阻止了泥石流材料的渗漏, 同时, 试验模型中耗能器性能存在一定离散性。

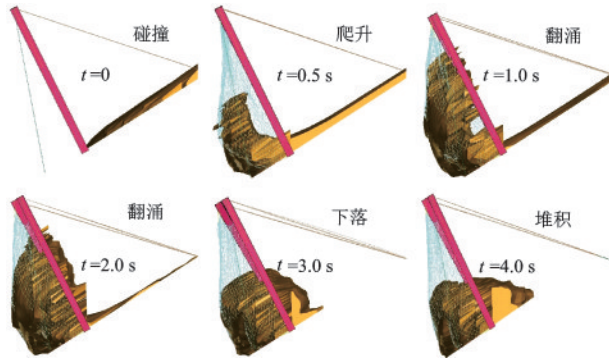
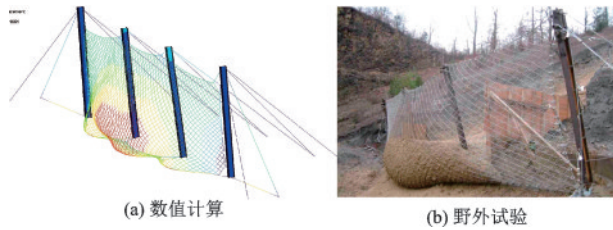


图8 横断面变形

Fig.8 Cross-sectional deformation



(a) 数值计算

(b) 野外试验

图9 柔性防护系统变形

Fig.9 Deformation of the flexible barrier system

耦合作用下绳索内力时程如图 10 所示。由图 10 可知, 无论是峰值, 还是稳定后的内力, 仿真计算结果均较试验值有一定的偏大, 尤其是下支撑绳内力偏大约 40%, 但整体趋势吻合较好。究其原因, 一方面是仿真模型中所采用的虚拟膜单元阻止了泥石流材料的渗漏, 冲击力偏大; 另一方面是试验时, 为了避免泥石流从柔性防护系统与沟槽之间的间隙中流出, 在沟槽与柔性防护系统之间覆盖有一层 L 形布置的辅助网片^[19], 其承载了部分冲击力。

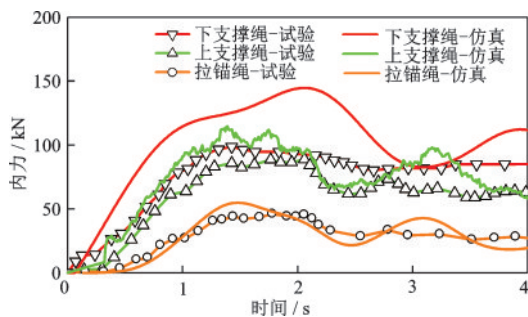


图10 绳索内力时程

Fig.10 Curves of cable force versus time

综上所述, 无论是泥石流的运动特征, 还是柔性防护系统的变形及绳索内力响应, 本文所建立的泥石流柔性防护系统耦合计算模型的结果均能与试验值吻合较好, 验证了耦合模型的有效性。

2.2.3 能量转换与耗散

耦合作用过程中泥石流冲击动能的转换与耗散关系如图 11 所示。由图 11 可知, 冲击柔性防护系统的泥石流总动能为 2 800 kJ, 拦截过程中转换为泥石流内能为 1 600 kJ, 占比高达 57.1%; 由柔性防护系统消耗的能量为 675 kJ, 其中耗能器消耗 250 kJ; 由滑移、摩擦、阻尼等耗散 525 kJ, 占比 18.8%。

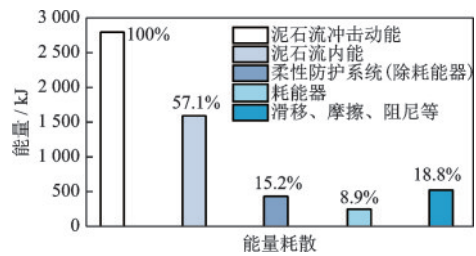


图11 能量转换与耗散

Fig.11 Energy conversion and dissipation

3 结 论

(1) 基于 LS-DYNA 平台, 采用 ALE 方法, 提出了泥石流柔性防护系统耦合数值模拟方法。该方法不仅能模拟泥石流流动、柔性防护系统的强非线性特性, 且能模拟泥石流与柔性防护系统耦合作用;

(2) 反演了既有野外足尺冲击试验, 通过与实测数据的对比, 验证了耦合计算方法的有效性; 由于该方法尚未实现柔性防护系统“滤水沉渣”特征, 系统内力响应较试验值偏大;

(3) 与落石柔性防护系统不同, 泥石流柔性防护系统对泥石流冲击能量的消耗较小。该反演模型中, 由柔性防护系统消耗的能量占泥石流冲击总动能的比例不到 25%, 将近 60% 冲击能量转换为泥石流内能, 这进一步说明了采用耦合方法进行泥石流柔性防护系统设计的必要性。

参考文献:

[1] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动

- 特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5):10-19.
- Cui P, Zhuang J Q, Chen X C, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5):10-19. (in Chinese)
- [2] 李睿祺, 胡桂胜, 陈宁生, 等. 川藏铁路沟谷型泥石流形成运动特征与工程危害研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3):432-440, 462.
- Li R Q, Hu G S, Chen N S, et al. Study on formation and motion characteristics and engineering hazards of gully type debris flow in sichuan tibet railway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3):432-440, 462. (in Chinese)
- [3] 王秀丽, 冉永红, 李俊杰. 带连续防撞墩的新型泥石流拦挡坝抗冲击性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3):474-480.
- Wang X L, Ran Y H, Li J J. Analysis of shock resistance of new debris flow dam with continuous crash bearers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3):474-480. (in Chinese)
- [4] 王根龙, 张茂省, 赵成, 等. 对三眼峪泥石流以往防治措施的反思[J]. 西北地质, 2011, 44(3):115-121.
- Wang G L, Zhang M S, Zhao C, et al. Post-thinking of the former mitigation measures for the Sanyanyu debris flow [J]. Northwestern Geology, 2011, 44(3):115-121. (in Chinese)
- [5] 陈晓清, 游勇, 崔鹏, 等. 汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1):14-22.
- Chen X Q, You Y, Cui P, et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1):14-22. (in Chinese)
- [6] 陈剑, 王全才, 王浩, 等. 基于 Hertz 理论的泥石流块石冲击力修正系数研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16):26-31.
- Chen J, Wang Q C, Wang H, et al. A study on the modified coefficient for impact force of boulders conveyed in debris flow based on the Hertz theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16):26-31. (in Chinese)
- [7] 贺咏梅, 成铭. 柔性防护技术在泥石流防护中的应用及研究进展[J]. 水土保持研究, 2007(3):292-294, 299.
- He Y M, Cheng M. Research on the application of flexible system to mitigation of mudflow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007(3):292-294, 299. (in Chinese)
- [8] Sze E H Y, Koo R C H, Leung J M Y, et al. Design of flexible barriers against sizeable landslides in Hong Kong [J]. HKIE Transactions, 2018, 25(2):115-128.
- [9] Volkwein A, Wendeler C, Guasti G. Design of flexible debris flow barriers [C] // 5Th International Conference Debris-Flow Hazard Mitigation. Italy: Mechanics, prediction and assessment, 2011: 1093-1100.
- [10] Denatale J S, Iverson R M, Major J J, et al. Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows [R]. United States: U.S. Geological Survey, 1999.
- [11] Bugnion L, Brian W M, Bartelt P, et al. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles [J]. Landslides, 2011, 2(9):179-187.
- [12] Brighenti R, Segalini A, Ferrero A M. Debris flow hazard mitigation: A simplified analytical model for the design of flexible barriers [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 54:1-15.
- [13] 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.
- [14] Song D, Choi C E, Ng C W W, et al. Geophysical flows impacting a flexible barrier: effects of solid-fluid interaction [J]. Landslides, 2018, 15(1):99-110.
- [15] Song D, 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.
- [16] 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):04019051.
- [17] Leonardi A, Wittel F K, Mendoza M, et al. Particle-fluid-structure interaction for debris flow impact on flexible barriers [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2016, 31(5):323-333.
- [18] Lee K S, Cho S H, Kim J H, et al. Impact force assessment of flexible debris-flow barriers using small-scale model test [J]. International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2017, 5(12):46-50.
- [19] Li X Y, Zhao J D. A unified CFD-DEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(14):1643-1670.
- [20] Kwan J S H, Sze E H Y, Lam C. Finite element analy-

- sis for rockfall and debris flow mitigation works[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(9):1225-1250.
- [21] 夏春兰. 被动柔性防护网在泥石流灾害治理中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
Xia C L. Study on the application of passive flexible protection to debris flow disaster management[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [22] 王鸿, 杨中福, 周灵. SNS柔性防护系统在泥石流治理工程中的探讨[J]. 山西建筑, 2008(3):129-130.
Wang H, Yang Z F, Zhou L. Discussion of the SNS flexibility protection system in debris flow treatment project [J]. Shanxi Architecture, 2008(3):129-130. (in Chinese)
- [23] 刘成清, 许城杰, 陈鑫, 等. 泥石流柔性防护系统破坏原因分析与设计对策[J]. 水利与建筑工程学, 2017, 15(5):6-11.
Liu C Q, Xu C J, Chen X, 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)
- [24] Kwan J S H, Cheung R W M. Suggestions on design approaches for flexible debris-resisting barriers [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, the HK-SAR Government, 2012.
- [25] EOTA, EAD 340020-00-0106 Flexible Kits for Retaining Debris Flows and Shallow Landslides/Open Slope Debris Flows [S]. EU: European Organisation for Technical Approvals, 2016.
- [26] 赵世春, 余志祥, 赵雷, 等. 被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制[J]. 工程力学, 2016, 33(10):24-34.
Zhao S C, Yu Z X, Zhao L, et al. Damage mechanism of rockfall barriers under strong impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10):24-34. (in Chinese)
- [27] 齐欣, 余志祥, 许浒, 等. 被动柔性防护网结构的累计抗冲击性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11):2788-2797.
Qi X, Yu Z X, Xu H, et al. Cumulative impact resistance of passive flexible protective structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11):2788-2797. (in Chinese)
- [28] Yu Z X, Zhao L, Liu Y P, et al. Studies on flexible rockfall barriers for failure modes, mechanisms and design strategies: a case study of Western China [J]. Landslides, 2019, 16(2):347-362.
- [29] Koo R C H, Kwan J S H, Lam C, et al. Back-analysis of geophysical flows using three-dimensional runout model [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(8):1081-1094.
- [30] Zhao L, Yu Z X, Liu Y P, et al. Numerical simulation of responses of flexible rockfall barriers under impact loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167:105953.
- [31] Xu H, Gentilini, Yu Z X, et al. An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers [J]. Engineering Structures, 2018, 173(10):831-852.
- [32] LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I [R]. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2018.
- [33] Bugnion L, Wendeler C. Shallow landslide full-scale experiments in combination with testing of a flexible barrier[C]//3rd International Conference on Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows. Italy: Univ Milano, 2010: 161-173.
- [34] Bugnion L, Boetticher A, Wendeler C. Large scale field testing of hillslope debris flows resulting in the design of flexible protection barriers [C]//12th Interpraevent congress, France: International Research Society INTERPRAEVENT, 2012: 59-66.

(本文责编: 苏泽云)