

高文军. 地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析 [J]. 华南地震, 2020, 40 (2): 105-110. [GAO Wenjun. Analysis of Impact Dynamic Response of Debris Flow Disasters after Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (2): 105-110]

地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析

高文军

(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

摘要: 采用当前方法分析地震后泥石流灾害柔性防治冲击的动力响应时, 不能准确的分析柔性防护体系随时间变化产生的位移变化以及落石在冲击过程中对柔性防护体系的冲击时间与能量关系, 得到的分析结果与实际不符, 存在分析准确率低的问题。提出地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法, 构建防护体系有限元模型, 利用 Lagrange 描述方法在连续介质力学的基础上构建撞击系统对应的控制方程以及弹塑性材料接触力学模型, 在以上两个模型的基础上通过 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟甘肃省陇南市某泥石流治理工程环境, 通过分析柔性防护体系随时间变化产生的位移变化以及落石在冲击过程中对柔性防护体系的冲击时间与能量关系, 实现地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力的响应分析。实验结果表明, 所提方法的分析准确率较高。

关键词: 地震; 泥石流灾害; 柔性防治冲击动力; 响应分析;

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 02-00105-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.02.016

Analysis of Impact Dynamic Response of Debris Flow Disasters after Earthquake

GAO Wenjun

(Northwest Research Institute Co., Ltd of C.R.E.C, Lanzhou 730000, China)

Abstract: When using the current method to analyze the dynamic response of the flexible prevention and control impact of debris flow disaster after earthquake, the displacement change caused by the flexible protection system over time and relationship between the impact time and energy of the falling rock on the flexible protection system during the impact process cannot be accurately analyzed. The result is inconsistent with the actual situation, and there is a problem that the analysis accuracy is low. The impact dynamic response analysis method of debris flow disaster prevention after earthquake is proposed, and the finite element model of the protection system is constructed. The Lagrange description method is used to construct the control equation corresponding to the impact system and the elastoplastic material contact mechanics model based on the continuum mechanics. Based on the model, ANSYS/LS-DYNA software was used to simulate a debris flow control engineering environment in Weinan City, Gansu Province. The displacement change caused by the flexible protection system over time and relationship between the impact time and energy of the falling rock during the impact process on the flexible protection system is analyzed. The response analysis of the flexible control of the debris flow disaster after the earthquake is realized. The experimental results show that the analytical accuracy of the proposed method is high.

Keywords: Earthquake; Debris flow disaster; Flexible control impact power; Response analysis

收稿日期: 2019-09-08

作者简介: 高文军 (1987-), 男, 工程师, 主要从事滑坡、泥石流、地基处理等地质灾害工程的防治与研究。

E-mail: gwjun001@163.com

0 引言

在我国总面积中山区面积约占三分之二。有一部分地区地形地貌复杂、地质构造活跃,同时地震、冰雪融化和降雨等自然因素以及人为因素的影响,导致区域植被覆盖度降低,进而引起危岩崩塌、泥石流、雪崩和滑坡等地质灾害,对地区人民的财产和生命造成威胁^[1]。其中泥石流的破坏性较大,通常伴随着洪水破坏、山坡滑动和崩塌滚石等多重作用,造成严重的灾害后果。

泥石流是由松散的液态水和固态土混合而成,是一种自然灾害过程及现象,沿坡面在自身重力的作用下向下游流动,在流动的过程中形成浓度较高的混合流,通常多发生在地形陡峭的地区,如深壑、沟谷和山地等^[2]。具有防御困难、突发性、不易监测、速度快、破坏大、历时短、冲击强和流量大等特点。泥石流威胁着人民财产和生命安全的同时,也破坏了当地的生态环境,如淤埋、冲毁水利工程、工厂、交通设施、农田和矿区,甚至毁坏风景旅游区、村庄和城镇等^[3]。泥石流的发生重创了居民心理的同时也妨碍了当地经济的发展和建设,使泥石流柔性防治冲击动力响应分析方法成为目前研究的热点,当前泥石流柔性防治冲击动力响应分析方法存在分析结果准确率低的问题,需

要对泥石流柔性防治冲击动力响应分析方法进行研究^[4]。

唐杰灵、李天斌、曾鹏等人根据现场测试和调查结果构建数值分析模型,获得石块在不同初始应力条件下对应的速度,根据泥石流冲击特征,建立泥石流柔性防护体系原型,获得数值分析模型,实现泥石流灾害柔性防治冲击动力的响应分析,该方法无法分析柔性防护体系随时间变化产生的位移变化,存在分析结果准确率低的问题^[5]。王秀丽、邓莹通过显示动力学方法对泥石流灾害柔性防护体系结构进行数值模拟,分析在结构不同位置时,冲击物作用下不同速度对防护体系产生的动力响应,该方法不能获得落石在冲击过程中对柔性防护体系的冲击时间与能量关系,存在分析结果准确率低的问题^[6]。

为了解决上述方法中存在的问题,提出地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法。

1 防护体系有限元

地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法参照泥石流柔性防护体系的相关试验确定有限元模型的相关尺寸,防护体系有限元模型如图1所示。

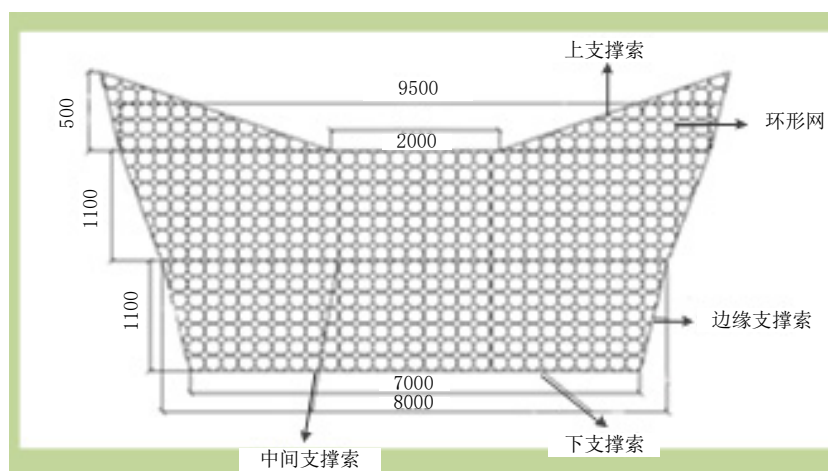


图1 防护体系有限元模型

Fig.1 Finite element model of protective system

由于研究的内容为环形网和支撑索的抗冲击性能,因此简化现场试验的防护体系。考虑泥石流大块石较短的持续冲击时间以及泥石流

柔性防护体系的拦挡原理和传力,在计算过程中不对减压环造成的影响进行考虑^[7]。因为与其他构件相比锚杆的失效破坏稍晚,所以耗能

贡献在防护体系中不太大，因此用固定约束代替计算模型中存在的锚杆作用。

(1) 材料力学性能参数

根据《一般钢丝绳用途》结合相关资料，地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法确定材料的参数指标，具体参数指标如下：

表 1 材料力学性能参数指标
Table 1 Mechanical properties parameter index of materials

构件	支撑索	环形网	大块石
弹性模量 /Gpa	178	178	31
密度 (kg/m ³)	7860	7860	2610
屈服强度 /Mpa	1780	1780	-
泊松比	0.31	0.31	0.28
切线模量 /Gpa	5.86	-	-
硬化指数	0.34	0.34	-
应变率参数	41	6	-
极限应变	0.06	0.06	-

(2) 网格划分

对防护体系有限元模型进行网格划分的过程中，计算结果受网格粗细程度的影响较大，对数值模拟计算产生决定性作用^[8]。模拟计算结果在网格划分太粗时有可能出现失真现象，模型计算时间随网格划分密集度的增加而增加。经过多次试验，确定泥石流灾害柔性防护体系有限元模型共存在 31 940 个单元，网格划分的尺寸为 20 mm。

2 理想撞击系统的控制方程及弹塑性材料接触力学模型

2.1 撞击系统的控制方程

通过 Lagrange 描述方法结合连续介质力学，得到冲击动力学系统的能量守恒方程、动量守恒方程和质量守恒方程^[9-10]，其表达式分别如下：

$$Q = Vs_{ij}\varepsilon'_{ij} - (p+q)V' \quad (1)$$

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho x_i'' \quad (2)$$

$$\rho V = \rho_0 V_0 \quad (3)$$

式中， V 代表的是当前结构对应的体积； s_{ij} 代表的是偏应力张量，其计算公式如下：

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + (p+q)\delta_{ij} \quad (4)$$

其中， σ_{ij} 代表的是 Cauchy 应力张量； q 代表的是体积粘滞系数； p 代表的是压力粘滞系数。

V' 代表的是体积 V 对应的一阶导数； ρ 代表的是结构对应的质量密度； x_i 代表的是质

点坐标； x_i'' 为坐标 x_i 对应的二阶导数； ρ_0 代表的是初始结构对应的质量密度； V_0 代表的是初始结构对应的体积。

初始条件可通过下式进行表示：

$$\begin{cases} x_i(X_j, 0) = X_0 \\ x_j'(X_j, 0) = v_i(X_0, 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中， v_i 描述的是初始速度。

通过下式描述边界条件：

$$\begin{cases} \sigma_{ij}n_j = t_i(t) \\ x_i(X_j, t) = K_i \end{cases} \quad (6)$$

式中， n_j 描述的是当前结构上力边界外对应的法线余弦值。

撞击系统在虚功原理的基础上获得对应的控制方程：

$$\int_V \rho x_i' \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_V \rho f_i \delta x_i dV - \int_S t_i \delta x_i dS \quad (7)$$

式中， t_i 代表的是在力边界 S 上作用对应的面力。上式中第一项描述的是系统在单位时间内对应的惯性力；第二项描述的是系统在单位时间内对应的内力；第三项描述的是系统在单位时间内对应的体力；第四项描述的是系统在单位时间内对应的外来的虚功。

2.2 弹塑性材料接触力学模型

设防撞墩和大块石之间符合 Hertz 接触条件，则法向变形和接触压力在完全弹性接触条件下的关系为：

$$P_e = \frac{4E'}{3} R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

式中, P_e 描述的是接触力; E' 描述的是等效弹性模量; R 描述的是等效半径; δ 描述的是法向压缩量。

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (9)$$

式中, E_1 代表的是大石块的弹性模量; ν_1 代表的是大石块的泊松比; E_2 代表的是拦砂坝对应的弹性模量; ν_2 代表的是拦砂坝对应的泊松比。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (10)$$

式中, R_1 描述的是大块石对应的半径; R_2 描述的是拦砂坝对应的界面长度。

接触面积和法向变形量之间存在下式:

$$a^2 = R\delta \quad (11)$$

式中, a 代表的是接触半径。

法向压缩量和弹塑性法向压力在接触材料为理想弹塑性情况下的关系如下:

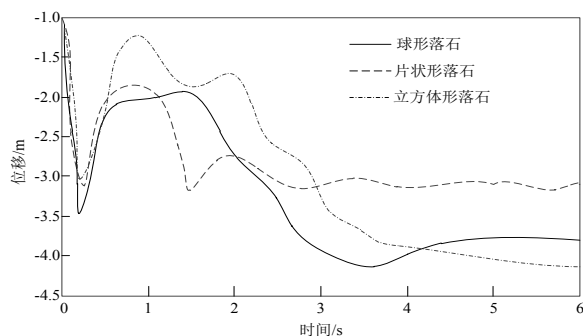
$$P_{ep} = P_y + 2R\pi P_y(\delta - \delta_y) \quad (12)$$

3 冲击动力响应分析

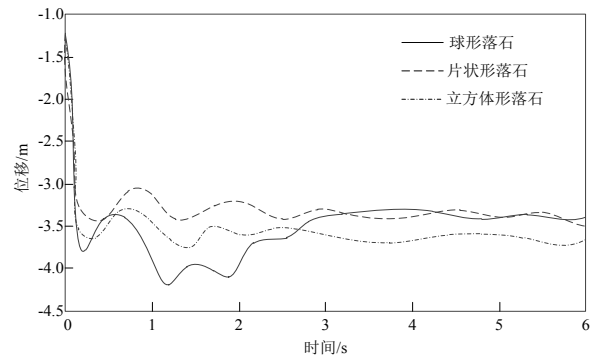
地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法通过 ANSYS/LS-DYNA 软件中给定形状不同的落石, 不同形状的落石均存在相同的初始速度。将冲击速度设置为 13 m/s, 分别以 30°、60° 和 90° 的冲击角对柔性防护体系的冲击力进行分析, 测试环境模拟甘肃省陇南市某泥石流治理工程。

3.1 时间与位移关系

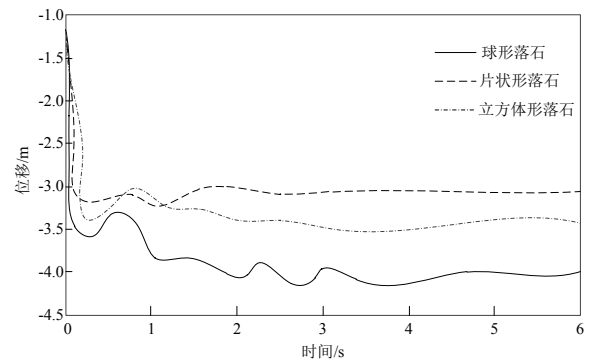
片状形落石、立方体形落石和球形落石以 30°、60° 和 90° 的冲击角冲击柔性防护结构体系时, 柔性防护体系随时间变化产生的位移变化如下图所示。



(a) 冲击角为 30° 时



(b) 冲击角为 60° 时



(c) 冲击角为 90° 时

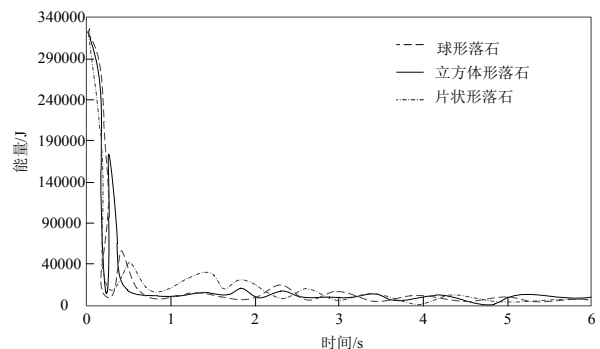
图 2 不同冲击角下不同形状落石的时间位移关系

Fig.2 Time - displacement relationship of falling rocks in different shapes under different impact angles.

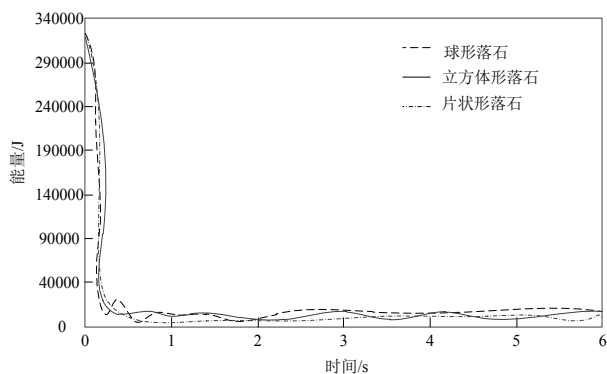
分析图 2 可知, 在冲击角度相同时, 片状形落石和立方体形落石冲击柔性防护体系结构产生的位移均小于球形落石冲击柔性防护体系结构产生的位移。通过上述析可知当落石形状相同时, 柔性防护体系结构位置随着冲击角度的减小而增大^[11]。

3.2 时间和能量关系

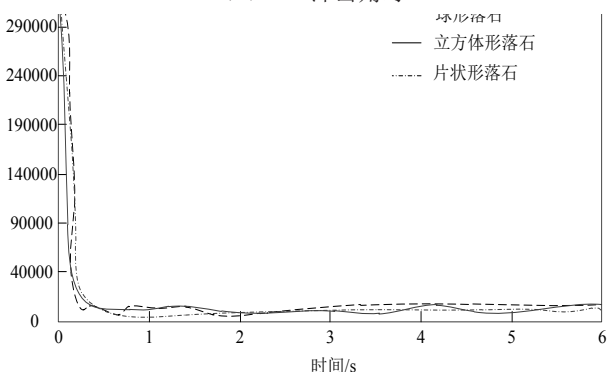
片状形落石、立方体形落石、球形落石在冲击过程中对柔性防护体系的冲击时间与能量关系如下:



(a) 30° 冲击角时



(b) 60° 冲击角时



(c) 90° 冲击角时

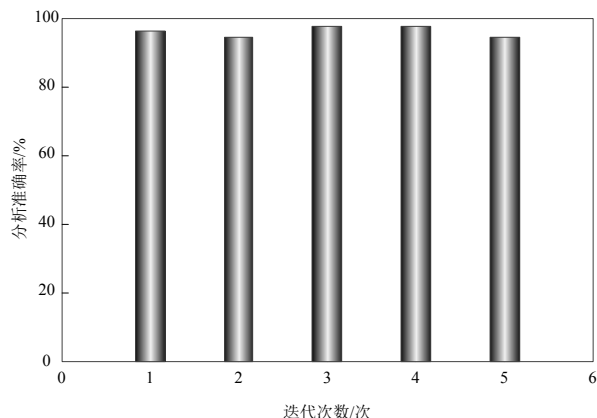
图3 不同冲击角下不同形状落石的时间能量关系

Fig.3 The relationship between the time and energy of falling rocks in different shapes under different impact angles

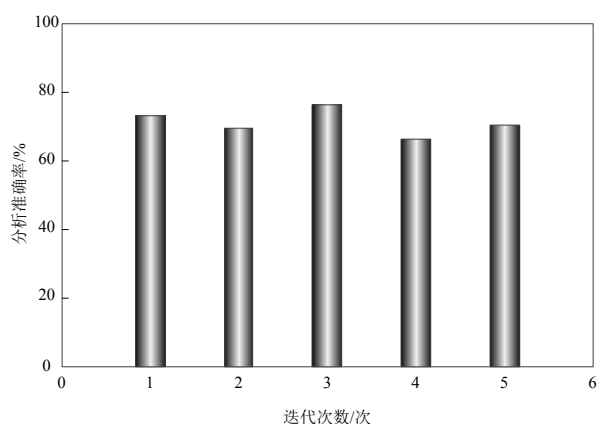
分析图3可知,片状形、立方体形和球形落石以329kJ的初始能量冲击泥石流柔性防护体系,此时泥石流柔性防护体系可以承受住冲击。球形落石在冲击角度为30°和60°时对应的反弹能量较大。与刚性防护结构的落石能耗过程相比,泥石流柔性防护体系耗散比较缓慢,因为柔性耗能装置在泥石流柔性防护体系中起到了缓冲作用,便于落石的拦截,由图3可知对柔性防护体系冲击最大的是球形落石。

3.3 对比实验

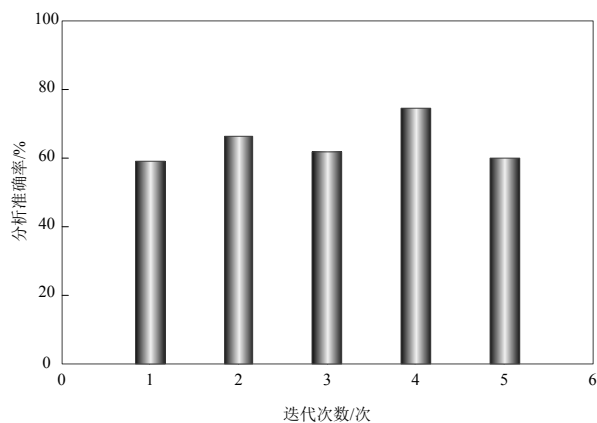
为了验证地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法的整体有效性,在Matlab平台中,采用Windows操作系统对地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法进行测试。分别采用地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法、文献[5]方法和文献[6]方法进行测试,对比三种不同方法的分析准确率,测试结果如下:



(a) 所提方法



(b) 文献[5]方法



(c) 文献[6]方法

图4 三种不同方法的分析准确率

Fig.4 Analysis accuracy of three different methods.

分析图4可知,在多次迭代中地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法的分析准确率均高于90%;文献[5]方法和文献[6]方法在多次迭代中获得的分析准确率分别在70%和60%附近波动,对比三种不同方法的分析准确率可知,地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法的分析准确率高出文献[5]方法

和文献^[6]方法的分析准确率。因为地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法构建了防护体系有限元模型,并建立了理想撞击系统的控制方程及弹塑性材料接触力学模型,提高了地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法的分析准确率。

4 结语

通过上述实验结果可知:

(1) 球形落石在冲击速度和冲击角度保持不变时,使泥石流灾害柔性防护体系结构产生最大位移,当冲击角度为 30° 且落石形状相同时,冲击产生的位移是最大的。

(2) 在能量角度分析,在冲击角度相同时,片状型落石、立方体形落石、球形落石冲击柔性防治体系时,反弹高度最大的是球形落石,表明球形落石对应的反弹能量最大。

(3) 通过对比实验可知,地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法的分析准确率较高。

综上所述,地震后泥石流灾害柔性防治冲击动力响应分析方法解决了当前方法中存在的问题,可以准确的分析地震后泥石流对柔性防护体系产生的冲击,为泥石流防治工作的展开提供了相关信息。

参考文献

- [1] 赵旭,黎若寒,代志杰,等.松动圈对隧道围岩地震动力响应的影响[J].北京工业大学学报,2019,45(3):243-252.
- [2] 周云东,上官子恒,褚飞飞,等.地震动非一致性对隧道动力响应的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(1):8-12.
- [3] 杜宪亭,乔宏,夏禾,等.地震作用下结构拟静力分量对车桥系统动力响应的影响分析[J].振动与冲击,2016,35(16):6-11.
- [4] 王小盾,董晓鹏,陈志华,等.爆炸地震波与空气冲击波联合作用下网架结构动力响应[J].工业建筑,2016,46(9):169-174.
- [5] 唐杰灵,李天斌,曾鹏,等.岩爆柔性防护网及其动力特性分析[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):793-802.
- [6] 王秀丽,邓莹.泥石流块石冲击下钢框架动力响应分析[J].兰州理工大学学报,2016,42(1):128-132.
- [7] 刘政伟,夏齐勇.船行波激励下深水桥墩的动力响应分析[J].桥梁建设,2018,48(3):85-89.
- [8] 李世杰,师素珍.薄层地震响应的时间与振幅分析[J].煤炭技术,2016,35(5):137-139.
- [9] 付朝江,杨绵越.横向冲击作用下预加荷载钢框架的动力响应分析[J].建筑科学,2018,34(11):42-50+78.
- [10] 康婷,白应生,孙惠香,等.爆炸冲击荷载作用下弹性支撑拱结构的动力响应分析[J].应用力学学报,2017,34(4):679-684.
- [11] 郭加伟,李永树,王洪蜀,等.基于迁移学习的无人机高分影像地震泥石流信息检测[J].地震研究,2018,41(2):180-185.