

吴强. 地震荷载作用下岩石边坡崩滑响应建模分析 [J]. 华南地震, 2020, 40 (2) :99-104. [WU Qiang. Modeling Analysis of Rock Slope Collapse Response under Seismic Load [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (2) :99-104]

地震荷载作用下岩石边坡崩滑响应建模分析

吴强

(福建岩土工程勘察研究院有限公司, 福州 350001)

摘要: 现有的边坡崩滑响应分析模型大多为统一性分析模型, 无法对地震荷载作用下的边坡进行分层分析, 其结果误差较大。为了适应当前边坡工程需要, 设计基于数值模型, 提出了一种多层化分析模型。设计首先构建的基础性数值模型, 根据边坡岩层划分不同的数据层, 标注对应物理参数, 设定虚拟网格尺寸和阻尼数据, 提出横向纵向不同的监测点数据组, 在初始数值模型基础上, 输入动力条件, 包括地震荷载入射角, S 波 P 波效应数据, 构建完整的数值分析模型, 应用模型分别从辩驳崩滑上方向和水平方向提取响应特征, 构建振动时程曲线, 完成多方向边坡崩滑响应分析。选择粘聚力作为实验测评指标, 在实验环境下构建数值模型, 并与 AGA 模型对比, 对比结果显示设计模型的分析结果更趋于真实性, 证明该分析模型真实有效, 值得进一步推广研究。

关键词: 地震荷载; 边坡崩滑; 建模;

中图分类号: F272 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 02-0099-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.02.015

Modeling Analysis of Rock Slope Collapse Response under Seismic Load

WU Qiang

(Fujian Institute of Geotechnical Engineering Investingation and Surveying Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Most of the existing slope collapse response analysis models are unified analysis models, which are unable to conduct stratified analysis of the slope under the action of seismic load, and the result error is large. In order to meet the needs of slope engineering, a multilayer analysis model is proposed based on numerical model. Design firstly builds the basic numerical model, according to the division of rock slope of different data layer, with corresponding physical parameters, set the virtual data grid size and damping, and sets transverse longitudinal data sets of different monitoring sites. On the basis of initial numerical model, the input power conditions, including earthquake load angle of incidence, effect data of P wave and S wave, the paper builds the complete numerical analysis model and application model respectively from the contentious collapse direction and horizontal direction response feature, constructs vibration time history curve, and completes slope collapse response analysis, exacts from multiple directions. The cohesion force is selected as the experimental evaluation index, and the numerical model is built in the experimental environment, and compared with the AGA model. The comparison results show that the analysis results of the design model tends to be more authentic, proving that the analysis model is true and effective, which is worth further promotion and research.

Keywords: Seismic load; Slope collapse; Modeling;

收稿日期: 2019-08-20

作者简介: 吴强 (1982-), 男, 岩土工程师, 主要从事岩土工程勘察设计、地基与基础工程施工, 地质灾害评估与治理、设计、施工等。

E-mail: wuqice@126.com

0 引言

岩石边坡工程又被分为临时边坡工程和永久边坡工程两类。岩石边坡可以看做是地球表面岩石露天侧向地质体工程。在施工过程中面临了大量的崩滑灾害。我国境内多山地丘陵,高原山地占地面积超过我国国土的70%,地质结构和环境客观决定了我国具有大量的滑坡、崩塌、泥石流等灾害。边坡经常会在自身重力的作用约束下,在崩滑过程中产生重大的形变危害。随着我国西部开发和振兴东北经济发展战略的实施,大量的边坡工程开始建设,边坡稳定性成为工程研究的重点问题^[1]。

我国处于多个地震带上,很长时间以来均深受地震危害^[2]。我国地震的频发性和危害性,对岩石边坡工程产生重要影响^[3-4]。现阶段我国针对边坡工程研究所应有的理论和方法,一般以边坡静态时数据为主^[5]。因为静态数据大多为固定值,研究相对简单。而边坡动力下的分析就显得更为复杂。边坡动力反应问题对于地震作用下边坡地质防治以及山区土木工程的设计和布局具有重要指导意义。虽然我国目前已经取得了一定研究成果,但是总体来说,水平层次还比较低。虽然自身较为简单,但是结果误差较大,只能应用于较为简单或者精确度要求不高的低阶作用下岩石边坡崩滑动态分析^[6-7]。此外还有物理模拟法,就是通过振动台试验,结合物理模型,模拟地震载荷,提取延时边坡崩滑响应数据。这种方法的准确度较高,

但是振动实验模型的尺寸需求较大,如果不能达到一定比例,实验结果同样会出现误差,整体耗费巨大。上述分析方法的核心问题在于无法进行动力拆解,对于岩石边坡崩滑响应的分析区域整体化,无法从内外多个方向进行,所以最终的结果误差较大。针对当前研究现状,设计从地震力方向入手,构建二维数据模型,并添加动力条件,从边坡多个方向进行分层影响分析,保证最终分析结果的精确度^[8]。

1 岩石边坡崩滑响应分析模型

经过多方证实,竖向地震载荷对于岩石边坡崩滑的作用同样十分明显^[9-10]。尤其是震中区域,竖向和水平地震载荷的加速比为0.5到2.5左右,其均值为1.35左右。在地震作用下,岩石边坡很容易触发倾斜崩滑效应。为了有效研究地震载荷作用下延时边坡崩滑响应关系,设计首先构建一种数值模型。因为岩石边坡崩滑动力响应包括速度、加速度、位移等,即便是同一边坡,不同方向上的相应规律也不同,所以在模型基础上添加动力条件,确定响应规律^[11]。

1.1 数值模型的建立

岩石边坡会受到岩性组合、岩体结构等多项影响^[12-13]。对其进行数值模拟需要综合考虑多项因素。为了研究地震作用下延时顺岩层边坡动力响应规律,设计构建边坡顺岩层模型,如图1所示。

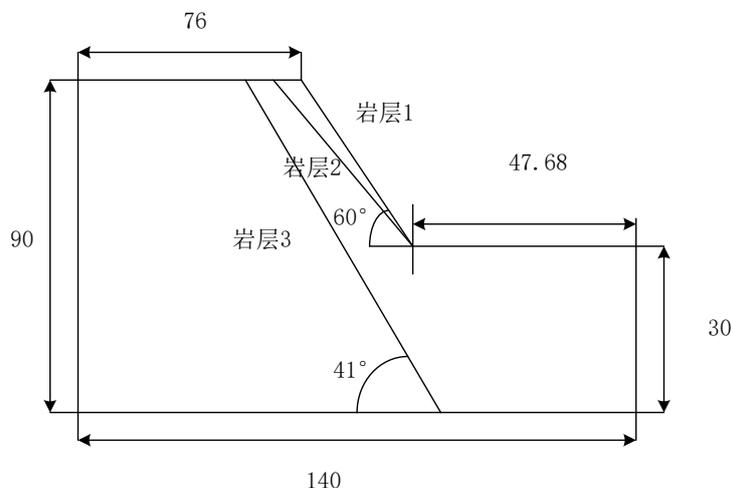


图1 边坡数值模型分析

Fig.1 Slope numerical model analysis

设边坡高度为 30 m，倾斜角度为 60°，岩层 1 为强风化岩层，岩体力学作用交第，岩层 2 位

微风化岩层，岩层 3 位基础完整岩层，坡顶存在少量的载荷裂隙。设定物理学参数表如下：

表 1 数值模型物理学参数表
Table 1 Physical parameters of numerical model

数值指标	密度 (kg/m ³)	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /Mpa	抗拉强度 /Mpa
岩层 1	2600	1.65	3.08	28	0.75	0.1
岩层 2	2650	3.69	5.59	35.5	3	1.7
岩层 3	2700	7.35	10.8	52.5	17	2.0

为了有效提高当前地震载荷以及作用地震波可以在数值模型内部进行有效船舶。设计将模型数据最大网格尺寸设定为 1 m。模拟材料以边坡常用模拟的碳素本构材料，强度准则为标准化强度准则，两侧需要标定横波延伸边界，可以有效避免地震载荷数据因为回弹产生差异划分误差。阻尼数据需要标定局部范围，一般情况下阻尼系数设定为 0.158。开始时需要先计算边坡静力数据，引入边界动力条件进行数据分析^[14]。在模型基础上设定数据分析点，对地震载荷下边坡速度的影响规律进行监测。设计按照固定间距，每组设定 A 到 G7 个监测点，破内距离 25 m 横向设定 V1 到 V6, 6 个监测点。坡顶距离 8.38 m 处设置 H1 到 H9, 9 个监测点。同时为了证明当前地震载荷的边界作用条件正确，在模型底端左右两侧分别设置了统一的加速点，速度监测点。通过分析当前模型顺岩层边坡各监测点在地震载荷下的 PGA 放大系数、位移制动变化和塑性区变化，可以得到当前边坡响应数值^[15]。

1.2 动力条件输入

在上述数值模型的技术上，将地震载荷以射角 α 入射角传入到边坡，根据力学作用特征可知，P 波在其传输方向上会产生两个载荷分量分别为 $F_p \sin \alpha$ 和 $F_p \cos \alpha$ 。其中， $F_p \sin \alpha$ 将产生水平加速度，而 $F_p \cos \alpha$ 会产生数值加速度。同理将地震载荷的 S 波传输方向进行解析，同样会产生两个载荷分量 $F_s \sin \alpha$ 和 $F_s \cos \alpha$ 。 $F_s \sin \alpha$ 产生竖向加速度，而 $F_s \cos \alpha$ 则产生水平加速度。当 P 和 S 波分别引入数值模型后，根据竖向加速度和力学分量会产生及速度分量组合。如图所示。

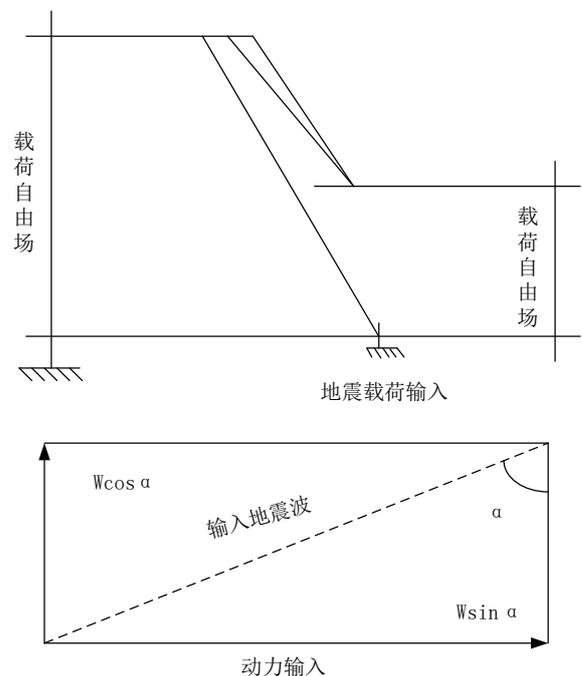


图 2 地震耦合作用下数值模型边界条件

Fig.2 Boundary conditions of numerical models under seismic coupling

随着地震载荷距离的不断叠加，P 波 S 波同时作用在边坡，水平增加速度分量由 $F_p \sin \alpha$ 和 $F_p \cos \alpha$ 组成，竖向加速度由力量分量组成。因为随着 P 波和 S 波的传输速度差异，会导致其产生边坡时间差 Δt ，

$$\Delta t = r \left[\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p} \right] \quad (1)$$

在公式中， r 表示地震震源距离， V_p 为地震纵波波速； V_s 表示地震横波波速。

在实际作用下，地震载荷的 P 波会直接作用到边坡下端，经过时间 Δt 后，S 波直接作用

达到边坡，所以对于某一时刻 t 来说，边坡会产生竖向加速度的地震作用力分量为：

$F_p \cos \alpha \cdot t_0 + F_s \sin \alpha \cdot (t_0 - \Delta t)$ ，而产生水平加

速度的地震作用分量为：

$F_p \sin \alpha \cdot t_0 + F_s \cos \alpha \cdot (t_0 - \Delta t)$ 。由此可以得出以下关系式：

$$\begin{cases} AH = \frac{f(P, S, \alpha, \Delta t)}{m} = \frac{F_p \sin \alpha \cdot t_0 + F_s \cos \alpha \cdot (t_0 - \Delta t)}{m} \\ AV = \frac{f(P, S, \alpha, \Delta t)}{m} = \frac{F_p \cos \alpha \cdot t_0 + F_s \sin \alpha \cdot (t_0 - \Delta t)}{m} \end{cases} \quad (2)$$

在公式中， t_0 为 P 波作用下的累积作用时间， $t_0 - \Delta t$ 表示当前 S 波作用边坡的累积时间， m 表示地震载荷作用下的边坡质量。

因为此次设计的模型边坡数据靠近震中，P、S 波垂直接近模型底部。所以需要添加模型横向加速，且所有加速均有 P 波产生。根据国家地震中心对于地震载荷的严格规定，所以设计选取神户模拟监测站，作为地震输入。P 波的峰值设定为 0.55 g，对滤波和基线进行矫正，并输入时间间隔 18 S，调整地震 P 波的加速线程，调整流程如下：

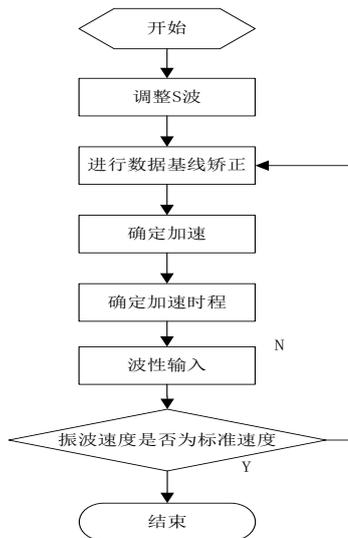


图3 加速线程调整流程

Fig.3 Accelerate thread tuning process

设 S 波的博峰值加速度调整为 0.125 g，对其进行滤波和基线矫正，持续输入时间保持在 15 s 左右。调整后确定 S 地震波的实际曲线。具体定位波动公式如下：

$$\varphi = \left\{ \frac{f_1(y) \cdot \exp}{kx} \right\} \quad (3)$$

其中， y 表示剪切波的真实值， kx 表示纵波平面。则有：

$$kx = \frac{P}{V_p} \quad (4)$$

此时纵波速度可以确定为 $V_p=6 \text{ km/s}$ ；横波速度表示为 $V_s=3 \text{ km/s}$ 。所以根据上述模型公式，可以确定时间传播差异性为 2.25 s，也就是模型地波的输入 P 波竖向加速度延迟 2.25 s 左右，由此可以进一步推导 S 波的水平加速度。根据数据模型，可以分析当前地震载荷作用下多方向的地震岩石边坡崩滑响应规律。

2 基于数值模型的边坡崩滑响应规律分析

依靠上述建立的数值模型，可以对地震载荷作用下延时边坡崩滑失稳过程中的相应特性和变化规律进行分析。分析过程包括多个方向，保证分析的最终准确度。

2.1 岩石边坡崩滑上方向响应特征

图 4 为当前模型下，坡面监测点水平振动和耦合震动下的时程曲线。通过坡面跟踪设置检测点 A 和 G，检测位移时程。

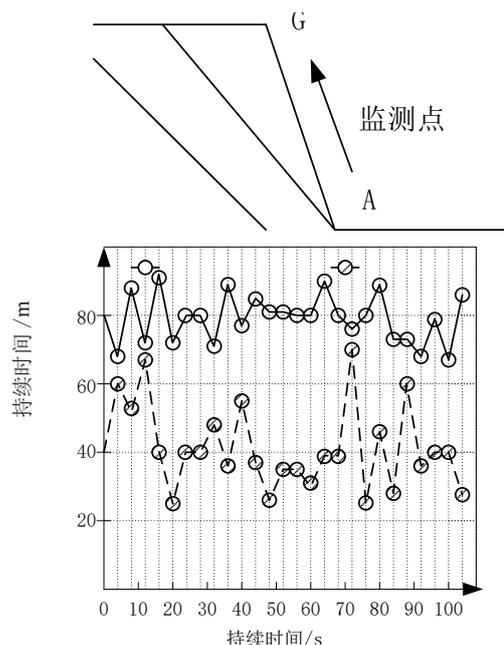


图4 位移响应振动时程曲线

Fig.4 Displacement response vibration time history curve

如图所示，随着地震波开始趋于稳定，坡面上位处在不同岩性位置的变化趋势开始重叠。第一阶段坡面上侧 G 监测点显示，岩石边坡的位移变化很小，这是因为地震波振动较小导致的，通过对监测点位置变化和结构面分层，构建结构面的基本弹性振动。振动结束后，分析是否存在弹性截面。根据坡顶出现的放大效应，构建地势分析表格，证明岩体结构面岩质边坡的动力反应控制作用。

根据控制作用力，制定极化象限，可以确定耦合作用时的崩滑响应数据，确定竖向地震力边坡的破坏作用。传统响应分析仅考虑水平振动，忽略竖向振动，并不能完全提取边坡动力响应，所以才会产生误差。此外边坡模型结构面会增长，在耦合作用下，结构面的位移增长量需要根据上述设计的数值模型进行计算，并需要引入波长入射角和相位差因素，提取上方向规律分析数值。

2.2 岩石边坡崩滑水平方向响应特征

为了更好分析提取延时边坡崩滑水平方向的分析特征，除了上述数值模型以外，还需要定义坡体内部动力响应下的加速峰度值 PGA 和坡体内部数值模型监测点 H8 的动力响应加速度峰值比值，如图所示。

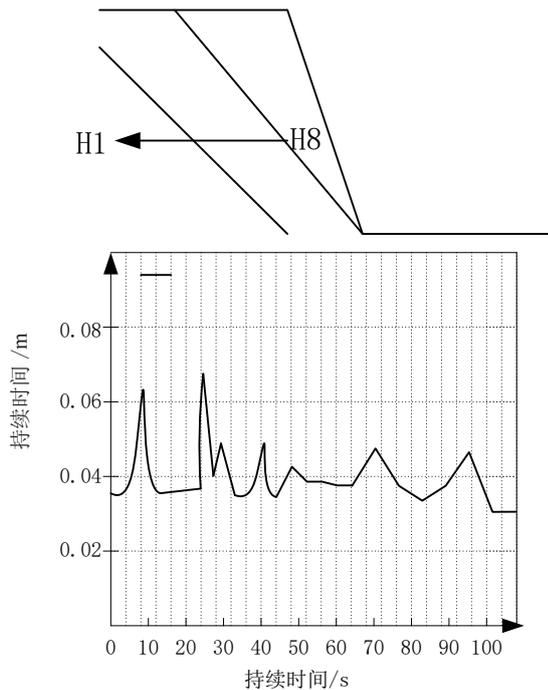


图 5 位移响应振动时程曲线

Fig.5 Displacement response vibration time history curve

图 5 包括 H1 到 H8 多个监测点，显示了坡体内部水平布置监测点位移时程变化。在模型基础上引入 PGA 放大系数可以确定，水平地震作用下耦合地震荷载随着距离增加的相应变化情况。因为岩层 2 和岩层 3 分属不同的结构面，竖向波和水平波地震反应截面之间容易出现小范围波动。由此可以确定放大系数之间的耦合作用距离。此外应用 PGA 放大系数和数值模型，仅对 300 米距离有效，超过此段距离的数据需要重新测算。

3 实验数据分析

上述依靠数值模型的多方向建模分析方法能否真正有效反映地震荷载作用下岩石边坡崩滑响应规律，需要进行仿真实验分析论证。

3.1 实验数值模型及环境搭建

实验验证模型的边界条件、单元分割、网格尺寸包括地震荷载差异输入均按照常规实验标进行。三维数值坡比为 1:0.3，图 6 位数值模型样本。

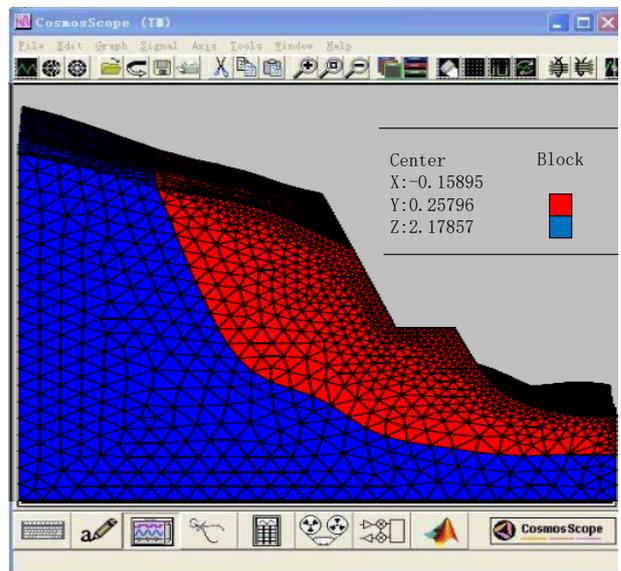


图 6 数值模型实验图

Fig.6 Numerical model experimental diagram

在对地震荷载岩石边坡崩滑的分析中，虽然内摩擦角、滑移量均为重要的评估分析指标，但是因为室内实验环境的局限性，实验最终选定粘聚力作为响应建模分析的实验判定指标。

为了判定上述分析模型的优势性,实验选择传统 AGA 模型作为数据参考。在实验模拟环境下,

仿真地震载荷,对边坡粘聚力进行分析测评。实验导入数据如下:

表 2 实验导入数据
Table 2 Experimental import data

上束角 / (°)	水平加速峰值 / (m/s ²)	竖直地震峰值 / (m/s ²)	坡面位移 / (mm)
36.5	0.15	1.62	0.42
凝聚力 (N)	上坡比 (C)	下坡比 (D)	加速度 (m/s)
2.75	1:1.5	1:2.7	0.32

在上述实验环境下进行数据提取,按照工程类比原则使用实验设定的两种模型对地震载

荷影响下的边坡崩滑粘聚力进行测评验证,结果如下:

表 3 粘聚力测评结果
Table 3 Cohesion test results

实验模型	粘聚力 (A)	粘聚力 (B)	粘聚力 (C)
设计模型	7.680	7.960	7.106
AGA	4.273	4.198	4.343

实验从边坡三个方向选择 A、B、C 三个基点作为数据参照,进行粘聚力测评。根据测评结果不难看出,上述设计模型的粘聚力测评结果均在 7.0 以上,而传统 AGA 模型则维持在 4 左右,二者出现明显差异,直接证实了设计模型的数据准确性。

4 结语

首先归纳和整理了当前岩石边坡崩滑研究数据,建立数值模型分析体系,结合当前实际情况输入动力条件。依靠完整数值模型从多个方向分析研究岩石边坡的崩滑数据,确定最终的数据范围,实验证明了当前数据的真实有效性。

参考文献

- [1] 杨兵,杨翔,杨涛,等.地震荷载作用下震裂-溃滑型边坡破坏过程及动力响应振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018(s1):3279-3290.
- [2] 寇昊,李宁,郭双枫.地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性研究进展[J].水利水电科技进展,2018,38(4):81-88.
- [3] 言志信,屈文瑞,龙哲,等.地震作用下锚固参数对岩体边坡锚固界面剪应力分布影响分析[J].岩土工程学报,2017,40(11):2110-2119.
- [4] 裴强,夏超南,刘小庆,等.预应力锚索抗滑桩支护边坡的地震动响应分析[J].煤炭技术,2018,37(09):63-64.
- [5] 王瑶.基于强度折减法的土质边坡在地震荷载下的稳定

- 性分析[J].黑龙江水利科技,2018,46(3):31-33+85.
- [6] 张江伟,李小军,齐剑峰,等.地震动参数对土坡地震响应的影响权重研究[J].振动与冲击,2018,37(6):225-230.
- [7] 吴文朋,李立峰,唐盛华,等.桥梁地震需求分析中建模不确定性的敏感性研究[J].振动与冲击,2018,37(24):274-281+287.
- [8] 李创第,朱腾飞,柏大炼,等.实用粘弹性阻尼器耗能结构非平稳地震响应的快速求解[J].广西科技大学学报,2018,29(04):16-23.
- [9] 吴礼浩,权芹钢,李磊,等.Roc Fall 软件在边坡岩石崩塌治理中的应用[J].江苏建筑,2019,195(01):106-108.
- [10] 孙志亮,孔令伟,郭爱国.下伏基岩堆积体边坡抗滑桩加固前后地震响应特征离心模型试验[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1413-1423.
- [11] 贾向宁,黄强兵,王涛,等.陡倾顺层断裂带黄土-泥岩边坡动力响应振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(12):85-96.
- [12] 陈睿,祝塘,李剑.探讨岩石高边坡勘察的变形稳定性评价分析[J].黑龙江交通科技,2017,40(7):78-78.
- [13] 牛焱炜,周小平,钱七虎.基于随机场的岩石边坡三维稳定性分析[J].土木建筑与环境工程,2017,39(3):129-137.
- [14] 李国祥,杜坤乾,张大磊,等.蒙库铁矿北帮边坡地质灾害体的基本特征及稳定性分析[J].西部探矿工程,2017,29(9):151-154.
- [15] 刘欣欣,唐春安,龚斌,等.基于 DDD 离心加载法的黑山铁矿西帮边坡稳定性研究[J].工程力学,2018,35(1):191-200.