

## 滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究

任占强, 宋章, 林棋文, 程谦恭, 刘毅, 邓凯丰, 蒙浩, 涂津

### A study of the similar material characteristics of fragmenting rock mass physical model

REN Zhanqiang, SONG Zhang, LIN Qiwen, CHENG Qiangong, LIU Yi, DENG Kaifeng, MENG Hao, and TU Jin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002024>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

#### 上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

#### 基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology

刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119-125

#### 扁铲探头贯入干砂的位移特征试验研究

An experimental study of the displacement characteristics of dry sand under dilatometer penetration

陈忠清, 吴天宇, 高彦斌, 吕越, 刘帅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 119-125

#### 抗滑桩应变特征与内力非线性研究

A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile

任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 吴鑫培, 陈斌 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 114-124

#### 二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002024

# 滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究

任占强<sup>1</sup>, 宋章<sup>2</sup>, 林棋文<sup>1</sup>, 程谦恭<sup>1,3</sup>, 刘毅<sup>2</sup>, 邓凯丰<sup>1</sup>, 蒙浩<sup>1</sup>, 涂津<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031; 3. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川成都 611756)

**摘要:** 高速远程滑坡物理模型试验中, 岩石相似材料的选择是模型试验成功的关键, 然而目前滑坡相似材料强度高、难以在缩尺试验中模拟滑坡破碎过程。以重晶石、石英砂为骨料, 石膏为胶结剂, 羧甲基纤维素钠、甘油、水作为辅助材料, 进行可破碎岩石相似材料的配比试验。采用控制变量法研究重晶石与石英砂比例(重石比)、骨料与胶结物比例(骨胶比)、羧甲基纤维素钠含量、拌合水量、甘油含量对相似材料物理力学性质的影响。试验结果表明: 所有配比情况下各相似材料物理力学参数的范围分别为单轴抗压强度为 0.12 ~ 1.47 MPa, 弹性模量为 25.51 ~ 148.12 MPa, 黏聚力为 1.63 ~ 87.39 kPa, 内摩擦角为 22.70° ~ 35.89°, 脆性指标主要分布在 0.033 ~ 0.145 之间; 重石比主要控制岩石相似材料的内摩擦角; 骨胶比减小, 对应的黏聚力和内摩擦角先增大后减小; 羧甲基纤维素钠对材料的单轴抗压强度、弹性模量、黏聚力等材料的力学特性以及材料的脆性指标影响均比较大, 其中对单轴抗压强度的影响最大。因此, 控制羧甲基纤维素钠和拌合水量的含量, 并合理调节重石比与骨胶比, 在相似比约为 1 : 600 的试验尺度下, 最终确定了适用于高速远程滑坡碎屑化过程模拟的低强度高脆性岩石相似材料的配比区间。

**关键词:** 高速远程滑坡; 岩石相似材料; 碎屑化; 低强度高脆性; 模型试验

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0132-11

## A study of the similar material characteristics of fragmenting rock mass physical model

REN Zhanqiang<sup>1</sup>, SONG Zhang<sup>2</sup>, LIN Qiwen<sup>1</sup>, CHENG Qiangong<sup>1,3</sup>,  
LIU Yi<sup>2</sup>, DENG Kaifeng<sup>1</sup>, MENG Hao<sup>1</sup>, TU Jin<sup>1</sup>

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;  
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

**Abstract:** Similar materials in the physical model test of avalanche are the key to the success of the model test. However, the strength of similar materials is high at present, it is difficult to be fractured within the scope of the experiment. The materials can reproduce the clastic process of landslide in the scale model experiment. Thus, we choose five raw materials to formulate similar materials. The five raw materials are barite, quartz sand, gypsum, sodium carboxymethyl cellulose, glycerin and water content. Five influencing factors are analyzed, including the ratio of barite to quartz sand, the ratio of aggregate to gypsum, contents of sodium carboxymethyl cellulose and glycerin, and water content. The aggregate consists of barite and quartz sand. The results show that (1) in all the

收稿日期: 2020-02-21; 修订日期: 2020-06-20

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察(Grant No.2019QZKK0905); 国家自然科学基金项目(41530639; 41761144080; 41877226; 41877237)

第一作者: 任占强(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事高速远程滑坡研究。E-mail: rzq@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 程谦恭(1962-)男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程与岩土工程方面的研究。E-mail: chenqiangong@swjtu.edu.cn

experiments, the uniaxial compressive strength ranges from 0.12 to 1.47 MPa, the elastic modulus, from 25.51 to 148.12 MPa, the cohesion, from 1.63 kPa to 87.39 kPa, the angle of internal friction, from 22.70° to 35.89°, and the brittleness index, from 0.033 to 0.145. (2) The ratio of barite to quartz sand has the great effect on the angle of internal friction. (3) With the decrease in the ratio of aggregate and cement, the cohesion first increases and then decreases. Sodium carboxymethyl cellulose has the greatest influence on the parameters of the similar materials, especially the uniaxial compressive strength. Therefore, it is important to control the sodium carboxymethyl cellulose, glycerin and water content and adjust the mass ratio of barite to quartz sand and the mass ratio of aggregate and cement. The obtained similar materials can be used to simulate the clastic process of avalanche when the similarity ratio is approximately 1 : 600.

**Keywords:** rockslide; rock similar material; fragmentation; low strength and high brittleness; model test

高速远程滑坡是由大型岩崩或岩滑发展而来的体积巨大、运动距离极远的超高速碎屑流,具有巨大的危害性,严重威胁着高山峡谷地区人民的生命财产安全和工程建设活动,因此一直是国内外学者研究的热点和难点<sup>[1]</sup>。

物理模型试验是研究高速远程滑坡的重要手段之一。目前,对滑坡变形破坏模式及其稳定性进行物理模型试验的研究较多,学者们研制了多种类型的滑体相似材料。吴锦华等<sup>[2]</sup>在古滑坡泥灰岩模拟相似材料试验研究中以重晶石粉、石英砂、石膏和水为原料配制滑坡原岩相似材料,分析各因素对相似材料物理力学指标的影响规律;崔雪婷等<sup>[3]</sup>在研究用于黄土边坡模拟的相似材料中,以黄土、河沙、石蜡油和水为原料,并通过报恩寺滑坡的底摩擦试验来验证相似材料配比的可靠性;徐楚等<sup>[4]</sup>在水库型滑坡试验中以标准砂、滑体土、膨润土和水为原料按照一定的比例制成模型相似材料,得到一种比较理想的水库滑坡相似材料。肖先焯等<sup>[5]</sup>选用不同比例的碎石、黏土、砂来进行滑坡变形特征的物理模型试验研究。但这些模型试验相似材料的强度均比较高,只适用于特定条件下的滑坡物理模型试验。目前也有用散体材料作为滑坡相似材料而进行室内模型试验的研究,如Sérgio<sup>[6]</sup>和Khosravi等<sup>[7]</sup>选用不同粒径的石英砂作为原材料,研究滑坡的破坏模式;Take等<sup>[8]</sup>选用风化花岗岩土壤作为滑坡模型试验的原材料,研究滑坡的形成机制。

由于高速远程滑坡由于其巨大的体积和超远的运动距离,在进行室内小尺度物理模型试验时,滑坡原型与模型的理论相似比极小,致使滑体相似材料的选取难以符合相似律并满足试验需求。王玉峰等<sup>[9-10]</sup>以谢家店子滑坡为原型,选用0.1~7mm棱角状的石英砂作为滑坡-碎屑流模拟的相似材料,分析了高速远

程滑坡运动过程中碎屑流的裹气流态化特性及堆积特征;郝明辉等<sup>[11]</sup>采用文家沟滑坡-碎屑流堆积物作为模型试验材料,研究高速远程滑坡-碎屑流的反粒序成因机制;郑光等<sup>[12]</sup>在滑坡-碎屑流离心机斜槽试验中,使用多种含水率的石英砂为原材料,模拟了不同重力条件下滑坡-碎屑流的运动过程;眭静等<sup>[13]</sup>在研究碎屑流冲击挡墙的力学模型试验中选用单一粒径的砾石作为模型材料,模拟碎屑流冲击过程;Pulfer等<sup>[14]</sup>选用直径为1.1mm的玻璃珠作为滑坡碎屑流的相似材料,研究颗粒的细观运动过程及堆积形态。但这些模型试验中选用的相似材料的初始状态为碎屑流颗粒,与滑坡源区原岩的强度特性相比一般难以满足相似率的要求。

另一方面,碎屑化过程是高速远程滑坡运动时十分普遍的现象,是可能解释滑坡远程运动的潜在动力过程之一<sup>[15-19]</sup>。然而,极少有人在物理模型试验中还还原高速远程滑坡的碎屑化过程,其主要原因在于相似材料配制的困难。目前常规的滑坡模拟相似材料,存在强度偏高、脆性较低等问题,无法模拟实验室尺度下滑坡的解体破碎现象。Bowman等<sup>[19]</sup>使用煤块作为岩石相似材料,在离心机里模拟滑坡的撞击破碎过程。由于煤块的强度偏大,在50g重力条件下仍然只取得较低的破碎程度。Haug等<sup>[20-21]</sup>使用土豆淀粉、石英砂等材料混合胶结,制成低强度岩石相似材料,用于块体碎屑化过程斜板试验。然而材料强度具有极大的不确定性和随机性,影响了试验结果的稳定性。综上所述,研制低强度高脆性岩石相似材料,使之适用于缩尺条件下滑坡碎屑化过程的模拟,是进行高速远程滑坡碎屑化机理及其远程运动效应研究的关键。然而至今尚未出现合理的岩石相似材料,即可在缩尺试验中符合岩石的破碎特征,又具有足够的强度稳定性。

本文旨在提出一种适合于高速远程滑坡碎屑化过程模拟的岩石相似材料。以重晶石、石英砂、羧甲基纤维素钠、石膏、纯净水、甘油为原材料,混合配制岩石相似材料,通过相似材料的强度测试研究不同原材料配比对单轴抗压强度、弹性模量、黏聚力以及内摩擦角等相似材料力学参数的影响规律,建立两者的拟合关系,从而提出适用于高速远程滑坡缩尺物理模型试验的、具有较低强度和较高脆性的岩石相似材料及其配比方案,以较好地模拟高速远程滑坡运动过程中的破碎现象。

## 1 相似理论与材料模型

### 1.1 相似理论

相似理论是物理模型的基础,进行物理模型试验时要求模型与原型要满足相似定律,即要满足模型的几何尺寸、边界条件、荷载、材料的容重、强度及变形特性方面的相似<sup>[22]</sup>。根据量纲分析的方法确定相似判据<sup>[23]</sup>。

本文选取控制物理模型试验设计的各主要物理量之间的关系为 $f(\sigma, E, \varepsilon, \mu, c, \varphi) = f(l, \gamma, g)$ ,其中 $\sigma$ 、 $E$ 、 $\varepsilon$ 、 $\mu$ 、 $c$ 、 $\varphi$ 、 $l$ 、 $\gamma$ 、 $g$ 分别为应力、弹性模量、应变、泊松比、黏聚力、内摩擦角、几何尺寸、重度、重力加速度。

相似系数为模型与原型的比值,根据拟开展的高速远程滑坡物理模型试验,取几何相似系数 $C_l=1/600$ ,密度相似系数 $C_\rho=1$ ,重力加速度相似系数 $C_g=1$ ,则计算可得该物理模型试验中的主要物理量之间相似关系如表 1 所示。

表 1 相似材料配制中主要物理量之间相似比  
Table 1 Ratios of the key parameters in the similar materials production

物理量	量纲	相似比	物理量	量纲	相似比
应力	$ML^{-1}T^{-2}$	1 : 600	内摩擦角	$M^0L^0T^0$	1 : 1
弹性模量	$ML^{-1}T^{-2}$	1 : 600	长度	L	1 : 600
应变	$M^0L^0T^0$	1 : 1	密度	$ML^{-3}$	1 : 1
泊松比	$M^0L^0T^0$	1 : 1	重力加速度	$LT^{-2}$	1 : 1
黏聚力	$ML^{-1}T^{-2}$	1 : 600			

### 1.2 模型相似材料力学参数确定

对于模型相似材料力学参数的确定,不仅需要已知各物理量之间的相似比,而且还需要确定原岩的强度参数,根据相似原理,确定相似材料的强度参数范围。大多数高速远程滑坡由硬岩组成,以石灰岩、砂岩、花岗岩为主要代表,以及部分岩性较为坚硬的变质岩。如谢家店滑坡滑体<sup>[24]</sup>岩性主要为正长花岗岩

及黑褐色砂岩;西藏波密易贡滑坡<sup>[25-26]</sup>滑体由花岗岩、大理岩、板岩组成。四川茂县新磨村高速远程滑坡岩性主要为石英砂岩<sup>[27-28]</sup>,这些岩性的主要共同特点在于都具有较高的强度;其抗压强度一般为 100~250 MPa,黏聚力为 30~50 MPa,内摩擦角为 45°~60°,弹性模量为 40~69 GPa,泊松比为 0.1~0.3。根据相似比可以得到模型相似材料的力学参数如表 2 所示。因此,根据相似定律,模型相似材料的力学参数在理论范围内即为符合高速远程滑坡模型试验要求。

表 2 模型相似材料力学参数

Table 2 The mechanical parameters of the similar materials

强度参数	抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
原岩	100~250	30~50	45~60	40~69	0.1~0.3
相似材料	0.17~0.42	0.050~0.083	45~60	0.067~0.120	0.1~0.3

## 2 试验准备

### 2.1 模型试验材料的选取

根据相似原理可知,相似材料强度远低于滑坡原岩的强度。综合前人的研究成果<sup>[29-31]</sup>,本文采用重晶石、石英砂、石膏、羧甲基纤维素钠、甘油按照一定的配比与水混合配制相似材料。重晶石、石英砂为骨料,石英砂的粒径为 60 目,重晶石粒径为 400 目;石英砂的作用是为了能够更好地与石膏胶结,重晶石是用于控制相似材料的密度,二者混合后均匀性好,所得到的材料可以看作为均质材料。石膏作为胶结物与骨料有着良好的胶结特性,同时硬化后具有较高的脆性。甘油作为缓凝剂,防止在配制相似材料的过程中,由于烘干导致试样失水过快而产生裂隙。羧甲基纤维素钠广泛应用于化工工业、食品工业等领域中,其作用为胶状增稠剂、乳化剂等。在前期的尝试性试验中发现羧甲基纤维素钠可以显著提高材料的脆性、减少模型相似材料破碎后的粉尘,因此,在正式实验中选用羧甲基纤维素钠作为添加剂,其作用是增加颗粒之间的胶结程度,增加材料力学特征的稳定性,从而控制材料的强度与脆性。

### 2.2 模型相似材料的试验方案设计

相比于正交实验,采用控制变量的方法,可以排除其它因素对试验结果的干扰性,更加精确的判断出每个因素与因变量之间的定量关系。因此,本试验通过控制变量法,对不同配比条件下的相似材料的强度参数进行测试分析,从而研究不同原材料对岩石相似材料力学特性的影响。

试验考虑重石比(A)、骨胶比(B)、羧甲基纤维素钠含量(C)、拌合水量(D)、甘油含量(E)5个因素,其中重石比是指重晶石与石英砂的质量比,骨胶比是指石英砂、重晶石的总质量与石膏的质量之比。每个因素设置5个试验水平共25组试验,其中羧甲基纤维素钠、水、甘油为固体总质量的百分比,每组试验制作5个标准圆柱试样和1个矩形试样分别进行单轴压缩实验和直剪实验。以重石比7:3、骨胶比30:1、羧甲基纤维素钠含量1.0‰、拌合水量22.50%、甘油0.5‰作为基础工况,基于控制变量法,在其他四个因素不变的情况下,分析另一个因素对试验结果的影响。例如在考虑重石比对试验结果的影响时,则每组试验的骨胶比、羧甲基纤维素钠含量、拌合水量、甘油分别设定为30:1、1.0‰、22.50%、0.5‰保持不变,重石比分别为10:0、8:2、6:4等。具体试验方案见表3。

表3 模型相似材料配比方案

Table 3 Matching schemes of the model materials

编号	重石比	骨胶比	羧甲基纤维素钠含量/‰	拌合水量/%	甘油含量/‰
S1	10:0	30:1	1.0	22.50	0.5
S2	8:2	30:1	1.0	22.50	0.5
S3	6:4	30:1	1.0	22.50	0.5
S4	5:5	30:1	1.0	22.50	0.5
S5	4:6	30:1	1.0	22.50	0.5
S6	7:3	15:1	1.0	22.50	0.5
S7	7:3	20:1	1.0	22.50	0.5
S8	7:3	30:1	1.0	22.50	0.5
S9	7:3	35:1	1.0	22.50	0.5
S10	7:3	40:1	1.0	22.50	0.5
S11	7:3	30:1	0.0	22.50	0.5
S12	7:3	30:1	0.5	22.50	0.5
S13	7:3	30:1	1.0	22.50	0.5
S14	7:3	30:1	1.5	22.50	0.5
S15	7:3	30:1	2.0	22.50	0.5
S16	7:3	30:1	1.0	17.50	0.5
S17	7:3	30:1	1.0	20.00	0.5
S18	7:3	30:1	1.0	22.50	0.5
S19	7:3	30:1	1.0	25.00	0.5
S20	7:3	30:1	1.0	27.50	0.5
S21	7:3	30:1	1.0	22.50	0.0
S22	7:3	30:1	1.0	22.50	4.0
S23	7:3	30:1	1.0	22.50	8.0
S24	7:3	30:1	1.0	22.50	16.0
S25	7:3	30:1	1.0	22.50	20.0

### 2.3 模型相似材料配制过程及试验方法

配制质地均一的材料是试验成功的关键,因此在配制过程的基本原则是尽可能进行精确测量和减少人为干扰。具体试样配制过程为:(1)按照配比设计

方案计算出每组试样的原材料质量;(2)将称取好的重晶石、石英砂、石膏、羧甲基纤维素钠充分干拌混合均匀;(3)将添加有甘油的水加入到材料的混合物中充分搅拌,制成可塑性强的材料;(4)倒入到标准模具中振实成型并将其放置在45℃的烘箱中烘干12h后成型脱模;(5)脱模后再放置在烘箱中烘干24h,使试样完全干燥。

相似材料的强度主要通过HTBW-1弹性模量实验机和电动四联直剪仪测量得到。制作的试样分别为直径50mm、高100mm和直径61.8mm、高20mm的标准试样。两种标准试样分别用于单轴压缩试验和直剪试验。部分标准试样见图1。



图1 部分标准试样

Fig. 1 Part of the standard specimens

## 3 试验结果及分析

### 3.1 模型相似材料试验结果

待试样完全干燥后,首先对每个试样进行称重和尺寸测量,计算出试样的密度;随后测量其物理力学参数。对于圆柱试样,通过弹性模量试验机测量试样的单轴抗压强度、弹性模量;对于矩形试样,使用环刀和切土刀切出标准直剪试样,通过电动四联直剪仪测量标准直剪试样在不同正向应力下的剪应力,进而求出试样的黏聚力和内摩擦角。试验结果见表4。

### 3.2 模型相似材料力学特性敏感性分析

采用控制变量的方法,考虑在不同水平下各因素对试验结果的影响。对试验数据结果进行敏感性分

表 4 试验结果

Table 4 Experimental results

物理力学参数	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
S1	0.323 8	79.49	25.16	33.02	1.729
S2	0.279 5	113.90	40.56	31.49	1.812
S3	0.283 2	115.26	58.45	22.70	1.861
S4	0.292 0	108.15	29.20	28.45	1.881
S5	0.338 3	84.06	26.08	35.89	1.855
S6	0.335 7	50.02	20.93	24.92	1.809
S7	0.357 8	64.86	46.42	31.82	1.800
S8	0.369 9	117.39	58.00	33.10	1.818
S9	0.381 8	104.79	79.10	30.19	1.800
S10	0.319 0	92.67	46.95	27.98	1.804
S11	0.115 4	52.28	1.63	32.50	1.859
S12	0.193 7	78.95	31.29	32.41	1.812
S13	0.369 9	117.39	58.00	33.10	1.804
S14	0.748 3	126.22	50.20	29.86	1.832
S15	1.472 7	148.12	61.99	32.13	2.220
S16	0.440 8	53.10	87.39	30.51	1.844
S17	0.344 6	87.45	61.21	30.29	1.803
S18	0.295 2	117.39	58.00	33.10	1.818
S19	0.270 4	51.32	48.12	28.77	1.779
S20	0.277 9	41.82	41.04	32.71	1.815
S21	0.243 6	116.41	50.70	28.76	1.804
S22	0.201 9	59.35	65.63	29.86	1.843
S23	0.131 6	58.18	47.91	30.95	1.805
S24	0.116 7	35.02	41.63	33.65	1.837
S25	0.164 8	25.51	54.82	28.88	1.885

析,以此判断各因素对模型相似材料的影响效应。其中敏感性分析是针对每一个因素采用极差和标准差作为评价指标,用于判断各因素对模型相似材料力学特性的影响程度。通过对比不同因素的极差,可以分析出在试验设置的水平范围内各个因素对试验结果影响效应。标准差与极差作用相同,计算标准差是与极差的结果相互印证。

其中极差(R)、标准差(σ)的计算公式分别为:

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (2)$$

式中: X——各物理参数;

μ——同一因素不同水平下各物理参数的均值。

(1) 单轴抗压强度

由图 2 可知,在各因素的影响下,单轴抗压强度分布范围在 0.115 4~1.473 MPa,其值随各因素的变化趋势为:①随重石比中重晶石占比的减小,单轴抗压强度变化范围不大,但仍有先减小后增大的趋势,在重

石比为 6:4 左右达到最小值,其结果与周辉等<sup>[33]</sup>在低强度高脆岩爆模型材料配比试验研究中得到抗压强度大小在石英砂重晶石含量为 40% 时抗压强度均达到最小的结论基本相符。②在骨胶比为 15:1~35:1 的范围内,随着骨胶比中骨料占比的增加单轴抗压强度变化不大,当骨胶比达到 40:1 时,单轴抗压强度略微减小。③随着羧甲基纤维素钠含量的增加,单轴抗压强度呈指数增加,在羧甲基纤维素钠含量为 2.0% 时,单轴抗压强度达到最大值。④随着拌合水量的增加,单轴抗压强度呈缓慢下降趋势。⑤随着甘油含量的增加,单轴抗压强度变化不大,基本稳定在 0.25 MPa 左右。

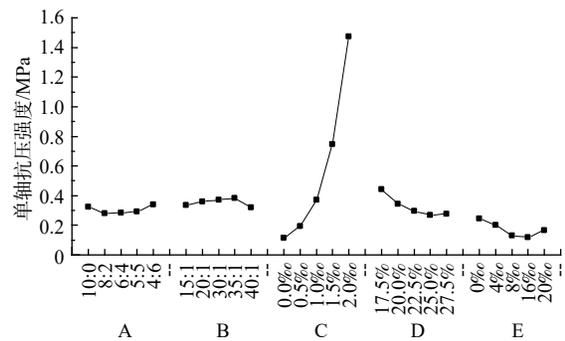


图 2 单轴抗压强度敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of the compressive strength

根据敏感性分析(表 5),羧甲基纤维素钠含量对单轴抗压强度的影响最大,其极差和标准差均为最大;重石比对单轴抗压强度的影响最小。各因素对单轴抗压强度敏感性影响从大到小为:羧甲基纤维素钠(C)>拌合水量(D)>甘油含量(E)>骨胶比(B)>重石比(A),即在试验所采用的配比范围内,羧甲基纤维素钠含量对单轴抗压强度起控制作用。

表 5 单轴抗压强度敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis of the compressive strength

水平	A	B	C	D	E
1	0.323 76	0.335 7	0.115 42	0.440 76	0.243 55
2	0.279 47	0.357 78	0.193 66	0.344 57	0.201 90
3	0.283 15	0.369 88	0.369 88	0.295 23	0.131 62
4	0.291 97	0.381 84	0.748 28	0.270 44	0.116 72
5	0.338 31	0.318 99	1.472 66	0.277 86	0.164 76
极差	0.058 84	0.062 85	1.357 24	0.170 32	0.126 83
标准差	0.026 20	0.025 47	0.555 52	0.070 47	0.051 85

(2) 弹性模量敏感性分析

由图 3 可知,弹性模量的分布范围为 25.51~

148.12 MPa, 随各因素的变化趋势为: ①随重石比中重晶石占比的减小, 弹性模量先增大后减小, 在重石比为 6 : 4 时达到最大值。②随着骨胶比中骨料占比的增大, 弹性模量先增大后减小, 在骨胶比为 30 : 1 时, 弹性模量为最大值, 其结果与李光等<sup>[32]</sup>在原料组分对动力学相似材料性质影响的试验研究中得到的结论一致。③随着羧甲基纤维素钠含量的增加, 弹性模量呈线性增加。④随着拌合水量的增加, 弹性模量先增加后减小, 在拌合水量为 22.50% 时达到最大值, 此时的含水率有利于最大限度地发挥材料的强度特性。⑤随着甘油含量的增加, 弹性模量呈线性下降趋势。

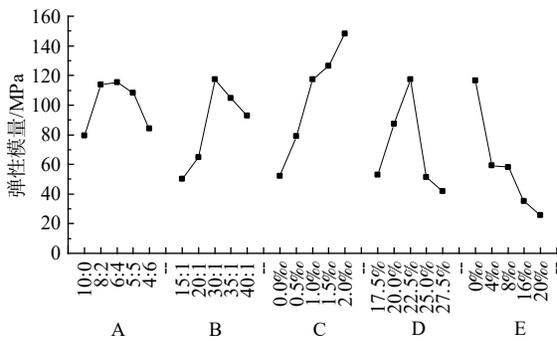


图3 弹性模量敏感性分析  
Fig. 3 Sensitivity analysis of elastic modulus

根据弹性模量敏感性分析可知(表6), 羧甲基纤维素钠含量对弹性模量的影响最大; 重石比对弹性模量的影响最小。各因素对弹性模量敏感性影响从大到小为: 羧甲基纤维素钠(C) > 甘油含量(E) > 拌合水量(D) > 骨胶比(B) > 重石比(A)。

表6 弹性模量敏感性分析  
Table 6 Sensitivity analysis of the elastic modulus

水平设置	A	B	C	D	E
1	79.49	50.02	52.28	53.10	116.41
2	113.90	64.86	78.95	87.45	59.35
3	115.26	117.39	117.39	117.39	58.18
4	108.15	104.79	126.22	51.32	35.02
5	84.06	92.67	148.12	41.82	25.51
极差	35.77	67.37	95.84	75.57	90.90
标准差	17.08	27.95	38.47	31.54	35.33

(3) 黏聚力敏感性分析

由图4可知, 黏聚力分布在 1.63 ~ 87.39 kPa 之间, 随各因素的变化趋势为: ①随重石比中重晶石占比的减小, 黏聚力先增大后减小, 在重石比为 6 : 4 时黏聚力达到最大值。②随着骨胶比中骨料占比的增大, 黏聚力先增大后减小, 在骨胶比为 35 : 1 时达到最大

值。③羧甲基纤维素钠含量在 0.0% ~ 1.0% 的范围内, 黏聚力随羧甲基纤维素钠含量的增加而急剧增加; 羧甲基纤维素钠含量在 1.0% ~ 2.0% 的范围内, 黏聚力趋于稳定, 基本稳定在 60 kPa 左右。④随着拌合水量的增加, 黏聚力逐渐减小。⑤随甘油含量的增加, 黏聚力变化不明显, 基本稳定在 50 kPa 左右。

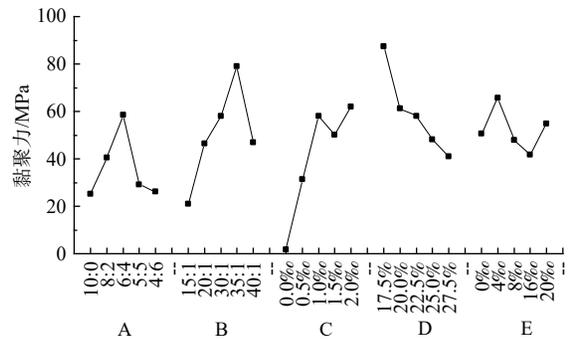


图4 黏聚力敏感性分析  
Fig. 4 Sensitivity analysis of cohesion

根据黏聚力敏感性分析(表7), 羧甲基纤维素钠含量对黏聚力的影响最大; 甘油含量对黏聚力的影响最小。各因素对黏聚力敏感性影响从大到小依次为: 羧甲基纤维素钠(C) > 骨胶比(B) > 拌合水量(D) > 重石比(A) > 甘油含量(E)。

表7 黏聚力敏感性分析  
Table 7 Sensitivity analysis of cohesion

水平设置	A	B	C	D	E
1	25.16	20.93	1.63	87.39	50.70
2	40.56	46.42	31.29	61.21	65.63
3	58.45	57.99	57.99	57.99	47.91
4	29.20	79.10	50.20	48.12	41.63
5	26.08	46.95	61.99	41.04	54.82
极差	33.28	58.17	60.37	46.35	24.00
标准差	14.03	21.08	24.79	17.70	8.94

(4) 内摩擦角敏感性分析

由图5可知, 内摩擦角的分布范围为 22.70° ~ 35.89°, 随各因素的变化趋势为: ①在重石比为 10 : 0 ~ 5 : 5 的范围内, 内摩擦角随着重石比中重晶石占比的减小先减小后增大, 在重石比为 6 : 4 时达到最小值。②随着骨胶比中骨料占比的增大, 内摩擦角先增大后减小。③羧甲基纤维素钠、拌合水量和甘油对内摩擦角的影响较小。

根据内摩擦角敏感性分析可知(表8), 重石比对内摩擦角的影响最大, 羧甲基纤维素钠含量对内摩擦角的影响最小。各因素对内摩擦角敏感性影响从大

到小依次为：重石比(A)>骨胶比(B)>甘油含量(E)  
>拌合水量(D)>羧甲基纤维素钠(C)。

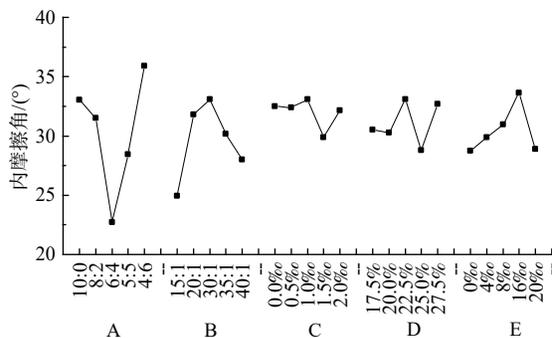


图 5 内摩擦角敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of the internal friction angle

表 8 内摩擦角敏感性分析

Table 8 Sensitivity analysis of the internal friction angle

水平	A	B	C	D	E
1	33.02	24.92	32.50	30.51	28.76
2	31.49	31.82	32.41	30.29	29.86
3	22.70	33.10	33.10	33.10	30.95
4	28.45	30.19	29.86	28.77	33.65
5	35.89	27.98	32.13	32.71	28.88
极差	13.19	8.18	3.23	4.33	4.89
标准差	5.03	3.24	1.24	1.80	2.01

## 4 讨论

### 4.1 相似材料脆性分析

低强度高脆性的相似材料是高速远程滑坡物理模型试验的关键，而脆性特性是相似材料的重要特性之一，因此对材料的脆性特性分析十分重要。周辉等<sup>[33-34]</sup>总结现有的基于强度、应力-应变曲线、加卸载试验、硬度等脆性指标，详细分析这些指标在评价材料脆性时的局限性。为合理、准确评价材料的脆性程度，本文提出一种建立在应力-应变曲线峰值后应力下降相对大小的新的脆性指标。通过单轴和三轴压缩实验很好地验证该脆性指标的可靠性。根据周辉等人的研究成果，选用这种新的脆性指标用来评价相似材料的脆性程度，可以真实反映材料的脆性特性。其中评价材料脆性程度大小的指标  $B_d$  的计算公式为：

$$B_d = (\tau_p - \tau_r) / \tau_p \times \lg K_{ac} / 10 \quad (3)$$

式中： $B_d$ ——材料脆性指标；

$\tau_p$ ——峰值强度；

$\tau_r$ ——残余强度；

$K_{ac}$ ——从屈服起始点(A)到残余起始点(C)连线的斜率。

$B_d$ 的取值范围为 0~1，其值越大脆性程度越高。由该公式得到各组试样的脆性指标及敏感性分析见表 9。

表 9 脆性指标敏感性分析

Table 9 Sensitivity analysis of the brittleness degree

水平设置	A	B	C	D	E
1	0.101	0.076	0.058	0.054	0.045
2	0.088	0.093	0.074	0.145	0.060
3	0.090	0.118	0.118	0.118	0.053
4	0.097	0.080	0.132	0.094	0.071
5	0.085	0.097	0.033	0.084	0.065
标准差	0.007	0.017	0.042	0.034	0.010

由图 6 可知，模型相似材料脆性指标分布范围为 0.033~0.145 之间，各因素对脆性指标的影响趋势为：重石比对脆性指标的影响很小，其脆性指标在 0.09 附近波动；随着骨胶比中骨料占比的增加，脆性指标先增加再减小，在骨胶比为 30:1 时，脆性指标达到最大值；随着羧甲基纤维素钠含量的增加，脆性指标不断增大，但在含量为 2.0% 时出现异常小值。随着拌合水量的增加，脆性指标先增大后减小，拌合水量为 20.00% 时，脆性指标达到最大值。随着甘油含量的增加，脆性指标的变化趋势很小，基本稳定在 0.06 左右。

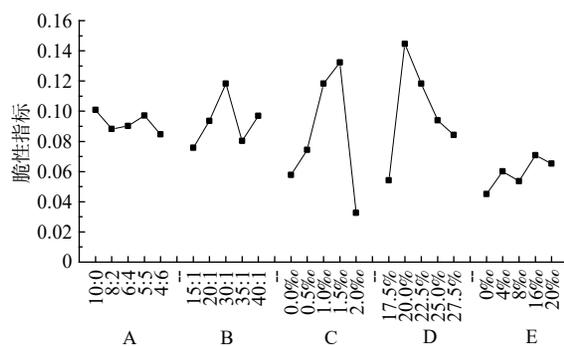


图 6 脆性指标敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of the brittleness degree

根据脆性指标敏感性分析(表 9)，羧甲基纤维素钠含量对脆性指标的影响最大，重石比的影响最小，各因素对脆性指标敏感性的影响大小为：羧甲基纤维素钠(C)>拌合水量(D)>骨胶比(B)>甘油含量(E)>重石比(A)。

### 4.2 各因素对模型相似材料强度特性的影响

根据各个因素对相似材料各物理力学参数的标准差，对每个物理力学参数的标准差进行归一化处理，归一化处理后的标准差见表 10。

由试验结果分析可知，重石比主要控制模型相似材料的内摩擦角，对黏聚力、弹性模量影响程度较小，

表 10 归一化后的标准差

Table 10 Standard deviation after normalization

归一化后的标准差	A	B	C	D	E
单轴抗压强度	0.036	0.035	0.761	0.097	0.071
弹性模量	0.114	0.186	0.256	0.210	0.235
黏聚力	0.162	0.244	0.286	0.205	0.103
内摩擦角	0.377	0.243	0.093	0.135	0.151
脆性指标	0.061	0.153	0.381	0.314	0.092

对单轴抗压强度、脆性指标的影响最小;造成这种结果的原因主要是随着重石比中重晶石占比的增加,试样中石英砂的含量不断增加,石英砂颗粒之间的咬和作用增强,从而影响试样的内摩擦角。

在本次试验中骨胶比主要影响模型相似材料的黏聚力和内摩擦角,即模型相似材料的抗剪强度。对于模型相似材料的其他力学特性影响较小。其中骨料控制着材料的内摩擦角,胶结物控制着材料的黏聚力。但是理论上骨胶比主要控制模型相似材料的单轴抗压强度<sup>[35]</sup>,造成试验结果与理论不一致的原因:一方面是在本次试验中骨胶比变化范围为15:1~40:1,即骨胶比选取的范围较小,因此骨胶比对单轴抗压强度的影响效果未能体现出来;另一方面,羧甲基纤维素钠对模型相似材料的单轴抗压强度影响效果显著,远大于骨胶比对模型相似材料的影响。

羧甲基纤维素钠是模型相似材料原材料中最重要的组成成分之一,它是影响模型相似材料的抗压强度、弹性模量、黏聚力及脆性指标的首要因素。羧甲基纤维素钠能够显著增加模型相似材料颗粒之间的黏结强度,因此对于材料的力学特性作用效果十分明显。但是在羧甲基纤维素钠含量为2.0‰时,脆性指标显著下降产生异常值,这是由于当羧甲基纤维素钠含量过高时,试样在烘干的过程中,表面会形成一层坚硬且不透水的“保护层”,该“保护层”会阻止试样内部水分的蒸发,从而导致该组试样数据值异常。

拌合水主要控制模型相似材料的脆性指标,对于模型相似材料的单轴抗压强度影响很小。适当的拌合水量能够充分发挥胶结物的粘结特性,从而影响模型相似材料的力学特性。试验发现,20.00%~22.50%的拌合水量为最佳拌合水含量,此时的拌合水量方便试样的制备,同时模型相似材料的脆性指标达到最大值。

甘油含量主要影响模型相似材料的弹性模量,随着甘油含量的增加,弹性模量显著下降。因此在配制相似材料的过程中甘油的含量选为0.5‰,这样可以在不影响材料力学特性的前提下,避免试样在烘干的

过程中产生裂隙,影响材料的力学特性。

### 4.3 相似材料破碎效果验证

本次试验的目的在于配制出适用于高速远程滑坡碎屑化过程室内物理模型试验的岩石相似材料。相似材料必须满足模型试验中相似比的要求,表11列出了根据相似比所确定的相似材料强度参数理论值以及配比试验中所有材料的实测值。

表 11 相似材料理论值与试验值

Table 11 Theoretical and experimental values of similar materials

相似材料强度参数	抗压强度/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa
理论值	0.17~0.42	50.0~83.3	45.0~60.0	66.7~115.0
实测值	0.12~1.47	25.5~148.1	22.70~35.89	25.5~148.1

由表11可知,相似比为1:600时,实验室尺度内满足相似条件的材料强度范围分别为:抗压强度0.17~0.42 MPa、黏聚力50.0~83.3 kPa、内摩擦角45.0°~60.0°、弹性模量66.7~115.0 MPa,而试验制作的相似材料的各个强度指标大多在这一合理区间内。但内摩擦角实测值与理论值相差较大,根据试验结果可知道,重石比对于相似材料的内摩擦角影响较大,25组工况中内摩擦角的实测值较理论值偏小,可以通过适当调节重石比来调节材料的内摩擦角,使得材料的内摩擦角满足理论值。

另一方面,由于高速远程滑坡运动过程中,岩石的破碎具有明显的脆性特征,具有动力破碎属性<sup>[36]</sup>。因此,为更真实地模拟滑坡碎屑化过程,岩石相似材料需满足脆性断裂特性,能够在实验室尺度下产生脆性破碎。通过强度测试确定出最适合模型试验的材料配比,其中配比为重石比7:3、骨胶比30:1、羧甲基纤维素钠含量1.0‰、拌合水量22.50%、甘油含量0.5‰最终选定用于试验的材料,即最优配比。

选用最优配比下的试验材料进行了室内斜板试验,结果见图7。可以看出,相似材料块体在斜板上加速下滑,撞击底板后碎裂,碎块继续运动并停积在平板上。室内斜板试验岩石相似材料的破碎特征与岩石的破碎特征具有一致性,即脆性断裂破碎,因此该相似材料可以作为室内模型试验的岩石相似材料,即在相似比为1:600时,最优配比情况下制作的相似材料适用于室内模拟大型岩质高速远程滑坡。该相似材料具有制作方便、力学性能稳定并且相似性好的特点,但遇水强度会发生改变,因此该相似材料不适用有水作用下的模型试验。

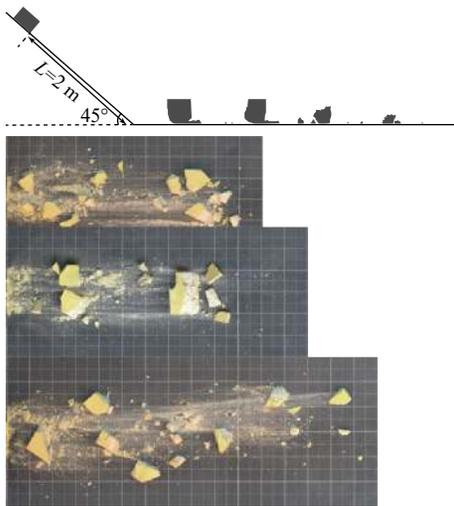


图 7 破碎效果图

Fig. 7 Picture of the crushing effect

## 5 结论

(1) 试验结果发现所有配比情况下各相似材料物理力学参数的范围分别为: 单轴抗压强度在 0.12 ~ 1.47 MPa 之间, 弹性模量在 25.51 ~ 148.12 MPa 之间, 黏聚力在 1.63 ~ 87.39 kPa 之间, 内摩擦角在 22.70° ~ 35.89° 之间。

(2) 重石比主要控制岩石相似材料的内摩擦角, 当重石比为 6 : 4 时, 内摩擦角取极小值 22.70°; 骨胶比中骨料占比减小, 对应的黏聚力和内摩擦角先增大后减小, 骨胶比为 35 : 1 时, 黏聚力达到极大值 79.1 kPa; 骨胶比为 40 : 1 时内摩擦角达到极大值 33.1°; 羧甲基纤维素钠对材料的单轴抗压强度、弹性模量、黏聚力等材料的力学特性影响均比较大, 其中对单轴抗压强度的影响最大。其中, 随羧甲基纤维素含量从 0.0% 到 2% 增加时, 材料单轴抗压强度迅速从 0.12 MPa 单调递增到 1.47 MPa, 弹性模量从 52.28 MPa 单调递增到 128.12 MPa, 黏聚力从 1.63 kPa 近似单调递增到 63.99 kPa; 甘油含量的增加(0.0% ~ 20.0%) 则显著抑制了岩石相似材料的弹性模量。

(3) 相似材料的脆性指标主要分布在 0.033 ~ 0.145 之间, 其中羧甲基纤维素钠以及拌合水量对材料的脆性指标影响最大。

(4) 所配制的岩石相似材料具有低强度高脆性特征, 满足缩尺试验的相似比要求, 适用于高速远程滑坡碎屑化过程的物理模型试验。

## 参考文献 (References) :

[ 1 ] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学研究

现状及发展趋势[J]. *山地学报*, 2007, 25(1): 72 - 84.

[ CHENG Qiangong, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Ruiqiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(1): 72 - 84. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 2 ] 吴锦华, 袁智洪, 周泳峰. 古滑坡泥灰岩模拟相似材料实验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(10): 81 - 86. [ WU Jinhua, YUAN Zhihong, ZHOU Yongfeng. Experimental study on simulated similar materials of ancient landslide marl[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(10): 81 - 86. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 崔雪婷, 张子东, 范珊. 基于相似理论的力学模型实验材料研究[J]. *人民珠江*, 2019, 40(5): 82 - 86. [ CUI Xueting, ZHANG Zidong, FAN Shan. Research on mechanical model test materials based on the similar theory[J]. *Pearl River*, 2019, 40(5): 82 - 86. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 徐楚, 胡新丽, 何春灿, 等. 水库型滑坡模型试验相似材料的研制及应用[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 4287 - 4293. [ XU Chu, HU Xinli, HE Chuncan, et al. Development and application of similar material for reservoir landslide model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4287 - 4293. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 肖先焯, 许模. 水库滑坡变形特征的模型试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 107 - 112. [ XIAO Xianxuan, XU Mo. Deformation behavior of landslide in reservoir by model tests[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(5): 107 - 112. (in Chinese) ]
- [ 6 ] LOURENÇO S D N, SASSA K, FUKUOKA H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides[J]. *Geomorphology*, 2006, 73(1/2): 115 - 130.
- [ 7 ] KHOSRAVI M H, PIPATPONGSA T, TAKAHASHI A, et al. Arch action over an excavated pit on a stable scarp investigated by physical model tests[J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(4): 723 - 735.
- [ 8 ] TAKE W A, BOLTON M D, WONG P C P, et al. Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes[J]. *Landslides*, 2004, 1(3): 173 - 184.
- [ 9 ] 王玉峰, 程谦恭, 张柯宏, 等. 高速远程滑坡裹气流态化模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2775 - 2786. [ WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHANG Kehong, et al. Study of fluidized characteristics of rock avalanches under effect of entrapped air[J]. *Rock and Soil*

- Mechanics, 2014, 35(10): 2775 – 2786. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 王玉峰, 许强, 程谦恭, 等. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1776 – 1791. [ WANG Yufeng, XU Qiang, CHENG Qiangong, et al. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1776 – 1791. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 郝明辉, 许强, 杨兴国, 等. 高速滑坡-碎屑流颗粒反序实验及其成因机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 472 – 479. [ HAO Minghui, XU Qiang, YANG Xingguo, et al. Physical modeling tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 472 – 479. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 郑光. 滑坡-碎屑流远程运动距离研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [ ZHENG Guang. Study on the long-runout distance of rock avalanche[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 睦静, 姜元俊, 樊晓一, 等. 碎屑流冲击刚性挡墙的力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 121 – 132. [ SUI Jing, JIANG Yuanjun, FAN Xiaoyi, et al. An impact model of granular flows on a rigid wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 121 – 132. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] GAËTAN P, EMMANUEL T, MOHAMED N. A physical model use as a rheometer to determine the friction parameter of granular flow[J]. Rock Mechanics, 2000, 22(2): 117 – 122.
- [15] DAVIES T R, MCSAVENEY M J, HODGSON K A. A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1096 – 1110.
- [16] BLASIO F V D, CROSTA G B. Fragmentation and boosting of rock falls and rock avalanches[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(20): 8463 – 8470.
- [17] PERINOTTO H, CHNEIDER J L, BACHÈLERY P, et al. The extreme mobility of debris avalanches: a new model of transport mechanism[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(12): 8110 – 8119.
- [18] LOCAT P, COUTURE R, LEROUEIL S, et al. Fragmentation energy in rock avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8): 830 – 851.
- [19] BOWMAN E T, TAKE W A, RAIT K L, et al. Physical models of rock avalanche spreading behaviour with dynamic fragmentation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(4): 460 – 476.
- [20] HAUG Ø T, ROSENAU M, LEEVER, K, et al. Modelling fragmentation in rock [C]// SASSA K, CANUTI C, YIN Y P. Landslide science for a safer geoenvironment, volume 2: Methods of landslide studies. Switzerland: Springer, 2014: 93-100.
- [21] HAUG Ø T, ROSENAU M, LEEVER K, et al. On the energy budgets of fragmenting rockfalls and rockslides: Insights from experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(7): 1310 – 1327.
- [22] 杜应吉. 地质力学模型实验的研究现状与发展趋势[J]. 西北水资源与水工程, 1996, 7(2): 64 – 67. [ DU Yingji. Research status and development trend of geomechanics model test[J]. Northwest Water Resources and Water Engineering, 1996, 7(2): 64 – 67. (in Chinese) ]
- [23] 袁文忠. 相似理论与静力学模型实验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 18-42. [ YUAN Wenzhong. Theory of similarity and statics model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998: 18-42. (in Chinese) ]
- [24] 刘玲霞, 李向全, 周志超, 等. 强震条件下谢家店滑坡碎屑流发生机制试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 104 – 109. [ LIU Lingxia, LI Xiangquan, ZHOU Zhichao, et al. An experimental study of the initiation mechanism of landslide debris flow under a strong earthquake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 104 – 109. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8 – 11. [ YIN Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi of Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(4): 8 – 11. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 戴兴建, 殷跃平, 邢爱国. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 1 – 8. [ DAI Xingjian, YIN Yueping, XING Aiguo. Simulation and

- dynamic analysis of Yigong rockslide-debris avalanche-dam breaking disaster chain[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 1 – 8. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 张涛, 杨志华, 张永双, 等. 四川茂县新磨村高位滑坡铲刮作用分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 142 – 149. [ZHAN Tao, YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, et al. An analysis of the entrainment of the Xinmo high-position landslide in Maoxian county, Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 142 – 149. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 温铭生, 陈红旗, 张鸣之, 等. 四川茂县“6·24”特大滑坡特征与成因机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 1 – 7. [WEN Mingsheng, CHEN Hongqi, ZHANG Mingzhi, et al. Characteristics and formation mechanism analysis of the “6·24” catastrophic landslide of the June 24 of 2017, at Maoxian, Sichuan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 1 – 7. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性相似材料概化配比实验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 1054 – 1058. [CHEN Luwang, BAI Shiwei. Proportioning test study on similar material generalization of rockburst tendency of brittle rock-mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Sup): 1054 – 1058. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 李天斌, 王湘锋, 孟陆波. 岩爆的相似材料物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2610 – 2616. [LI Tianbin, WANG Xiangfeng, MENG Lubo. Physical simulation study of similar materials for rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 2610 – 2616. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 周辉, 陈珺, 张传庆, 等. 低强度高脆岩爆模型材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2039 – 2049. [ZHOU Hui, CHEN Jun, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study of the rockburst model material with low-strength and high-brittleness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2039 – 2049. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 李光, 马凤山, 徐佩华. 原料组分对动力学相似材料性质影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 676 – 681. [LI Guang, MA Fengshan, XU Peihua. Experimental study on property of dynamic similar material made of different raw materials[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 676 – 681. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1114 – 1122. [ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1114 – 1122. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] MENG F Z, ZHOU H, ZHANG C Q, et al. Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5): 1787 – 1805.
- [35] 耿晓阳, 张子新. 砂岩相似材料制作方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 23 – 28. [GENG Xiaoyang, ZHANG Zixin. Study on preparation methods for similar materials of sandstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 23 – 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [36] WANG Y F, CHENG Q G, LIN Q W, et al. Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche(Tibetan Plateau, China) based on its complex surface landforms[J]. *Geomorphology*, 2018, 317: 170183.

编辑: 汪美华