

大型振动台试验饱水白云岩相似材料配比研究

高会会^{1,2}, 裴向军^{2*}, 崔圣华², 朱凌², 梁玉飞²

(1. 四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院, 成都 610081;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059)

摘要: 为开展安县大光包滑坡水激发效应及启动机理进行研究, 研制适用于振动台试验的饱水白云岩相似材料是该项工作重要基础, 其试验结果的有效性很大程度上由相似材料原材料及配比决定。以正交试验作为研究方法, 选取水为掺和剂, 9 000 型超细水泥为黏结剂, 40 目石英砂、铁粉、重晶石粉为骨料, 选择 40 目石英砂/固体材料(A)、铁粉/(铁粉+重晶石粉)(B)、9 000 型超细水泥/固体材料(C)作为正交设计的 3 个因素, 每个因素选取 4 个水平, 共设计 16 组方案配比。对配比不相同的相似材料水稳性指标、密度、抗压强度、渗透系数、弹性模量、水稳性指标等性质指标进行测试, 并对试验结果进行敏感性分析, 最终确定相似材料配比。敏感性分析结果表明: B 因素对于密度控制起主要作用; C 因素对于抗压强度、弹性模量的控制起主要作用; A 因素对于渗透系数的控制起主要作用。研制的饱水白云岩相似材料可为后续斜坡模型试验提供重要参考和依据, 也可广泛应用于采矿、水利、地质及岩土等工程领域模型试验。

关键词: 水稳性; 相似材料; 试验研究; 敏感性分析

中图分类号: TU411.3; TU502 **文献标识码:** A

STUDY ON THE SIMILAR MATERIALS RATIO OF SATURATED DOLOMITE IN LARGE SHAKING TABLE TEST

GAO Hui-hui^{1,2}, PEI Xiang-jun², CUI Sheng-hua², ZHU Ling², LIANG Yu-fei²

(1. Sichuan Institute of Land Spatial Ecological Restoration and Geological Disaster Prevention and Control, Chengdu 610081, China; 2. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to carry out the research on the water excitation effect and starting mechanism of Daguangbao landslide in Anxian County. It is an important basis for this work to develop a similar material of saturated dolomite suitable for shaking table test. The validity of the test results depended on the correct selection of similar materials and the reasonable determination of the ratio. In this paper, the orthogonal design method was used, and water was selected as the admixture. Selecting water as admixture, 9000 type ultra-fine cement as binder. Selecting 40 mesh quartz sand, iron powder and barite powder as aggregate. Taking 40 mesh quartz sand/solid material (A), iron powder/(iron powder + barite powder) (B) and 9000 type ultra-fine cement/solid material (C) as three factors of orthogonal design. Each factor was set with 4 levels, a total of 16 sets of ratio schemes. The water stability index, density, compressive strength, permeability coefficient, elastic modulus, water stability index and other physical and mechanical properties of similar

收稿日期: 2023-12-08 **改回日期:** 2024-01-17

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC1505205); 国家自然科学基金(41572302); 国家创新研究群体科学基金(41521002)

materials with different proportions were tested. And the sensitivity analysis of the test results was carried out to finally determine the proportion of similar materials. Sensitivity analysis results show that: factor B plays a major role in density control; factor C plays a major role in the control of compressive strength and the elastic modulus; the A factor plays a major role in the control of the permeability coefficient. The developed saturated dolomite similar material can provide important reference and basis for subsequent slope model test. And can also be widely used in model tests in mining, water conservancy, geology and geotechnical engineering fields.

Key words: water stability; similar material; experimental investigation; sensitivity analysis

大光包滑坡是汶川地震所引发的规模最大的滑坡,估算体积达 $11.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,已有研究表明^[1-3],大光包滑坡滑带产生于埋深 400 m、最大厚度达 5 m 的层间错动带,该层间错动带岩性主要为白云质断层岩,且滑坡的发生与地下水运移有很大相关性。

开展大型振动台物理模型试验是揭示斜坡强震动力响应和启动机理的最有力的试验手段之一。物理模型试验依托相似理论,选取荷载作用方式及降雨模式等作为作用变量条件,研制出适用于工程实体及其地质结构特征的相似材料,进行工程实体安全稳定性及地质结构破坏特征研究,一直是研究滑坡、堤坝、深基坑及洞室等各种复杂岩土体工程安全稳定性及破坏特征的有效方法^[4]。与数值模型相比,更易于研究某作用力变化情况下直至破坏的模型整个变化过程^[5]。

相似材料原材料的选择及相关配比的设置对材料的力学性质影响很大,并对试验的结果至关重要^[6],相关专家学者对相似材料已经进行了大量研究工作。李光等^[7]选择重晶石粉、河沙、铁粉等为原料,胶结物为速干水泥,通过试验研究了不同配比相似材料动力学性质;周辉等^[8]选择石英砂、重晶石粉、高强石膏与水泥为原料,测定了模型材料的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、岩爆倾向性指数、脆性程度大小和脆性破坏强度;姚国强等^[9]以铁精粉、重晶石粉、石膏、石英砂、水泥、甘油为原料设计多组试验,配制相似材料,并对密度、抗压强度、弹性模量、泊松比等物理力学参数进行研究;刘金辉等^[10]以石膏、浮石、硅藻土等材料为相似材料对多孔含水岩层进行相似材料模拟,对相似材料的密度、抗压强度、弹性模量等进行研究。前人多关注相似材料的物理力学性质指标,很少对相似材料渗透性及水稳性进行研究,很少有专门针对白云岩相似材料,但滑坡等工程领域灾害的形成与水有很大的关系,对相似材料的水理性质进行研究十分必要。

参考以往专家学者研究成果,结合本试验涉及

多因素、多水平特点,本文采用正交试验作为研究方式,选取 9 000 型超细水泥为胶结剂,石英砂(40 目)、重晶石粉(400 目)、铁粉(80 目)为骨料,加水拌和,以确定不同配比的相似材料,并进行了水稳性指标、密度、渗透系数、水稳性、单轴抗压强度及弹性模量试验,研制出了一种满足大型振动台物理模型饱水试验需求且应用范围很广的相似材料。

1 相似理论

模型试验相似原理是指模型在几何要素和物理要素等方面与原型符合某种比例关系,使得模型可通过试验再现原型相关性质的现象^[11]。本试验采取 Buckingham π 相似理论量纲分析法,其相似关系可根据原型与模型的相关关系并结合量纲分析法推导,具体条件包括几何、平衡物理方程关系以及应力、位移边界条件^[12]:

$$C_\sigma = C_g \times C_l = C_E \times C_g \quad (1)$$

$$C_\rho = C_l \times C_\epsilon \quad (2)$$

$$C_\sigma = C_E = C_\alpha \quad (3)$$

$$C_k = C_l = (C_l/C_g)^{1/2} \quad (4)$$

式中, C_σ 为应力; C_g 为重度; C_l 为几何尺寸; C_E 为弹性模量; C_ϵ 为应变; C_c 为抗压强度; C_k 为渗透系数; C_t 为时间等参量的相似系数。本次模型相似系数 C_l 定为 100,则 C_k 为 10, $C_\rho = 1.2$, $C_E = C_\alpha = 100$ 。

本文相似材料原型为大光包滑坡层间错动带主要岩石白云岩^[13]。原型与模型相关参数如表 1 所示。

表 1 白云岩原型与模型材料物理力学参数

材料类型	粘聚力 /kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	渗透系数 / $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
原型	18 000	42	2.9	200	25 000	—
相似系数	100	1	1.2	100	100	10
模型	350	53.47	2.58	2.87	248.6	1.49×10^{-5}

2 相似材料正交试验配比方案

2.1 相似材料原材料的选择

白云岩相似材料以石英砂(40目)、重晶石粉(400目)、铁粉(80目)、9 000型超细水泥为固体材料,水为液体材料。其中石英砂、重晶石粉、铁粉为骨料,铁粉用于提高相似材料重度,9 000型超细水泥为胶结剂,水为拌和剂。

2.2 试样制作及测试仪器

根据试样各物理参数测试设备的不同,共采用3种模具制作试样:Φ50 mm×h100 mm三开钢制圆柱模具、Φ61.8 mm×h40 mm^[14]钢制渗透环刀、Φ61.8 mm×h20 mm钢制剪切环刀、50 mm×50 mm立方体模具,如图1所示。对相似材料水稳性、密度、弹性模量、无侧限抗压强度、渗透系数等进行试验。制作抗压强度试样时首先在三开模具内侧涂抹石蜡油然后再覆盖一层保鲜膜,覆盖保鲜膜的目的是方便拆样,之后分4层装入搅拌均匀的相似材料,逐层夯实,相邻层间用刀片打毛以确保不同层间有效结合;制作环刀试样时需将环刀内壁涂抹一层凡士林,多层压实,相邻层间需用刀片打毛,立方体试样分3层制作,逐层夯实,模具内壁刷石蜡油便于试样拆卸。为确保不同几何尺寸的模具所制得模型材料的物理力学性质较为接近,计算使相同配比不同模具制作的相似材料具有相同密度。

试验用到的仪器有电子万能试验机、变水头渗透仪、YDS-2型多功能便携式直剪试验仪。部分试样及仪器如图1所示。

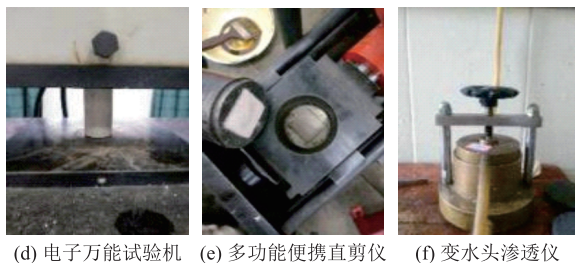


图1 部分试样及仪器图

2.3 正交试验方案设计

正交试验设计囊括概率论数理统计、实践经验

及专业技术等相关知识,可以充分利用标准化表格来分析多变量要素试验,并可通过对试验结果进行分析,快速找到最佳配比,达到简化试验环节的科学研究方法^[15]。正交试验设计优点主要表现在以下几个方面:

(1) 能用较少的试验次数均匀选出有代表性的部分配比试验方案。

(2) 采用极差、方差等分析方法,可进行多方位分析,得到相关价值结果。

(3) 通过对试验结果进行深入分析,可得到优化调整方案及超出试验效果的许多信息。

在正交试验中,以40目石英砂/固体材料(A)、铁粉/(铁粉+重晶石粉)(B)、9 000型超细水泥/固体材料(C)作为正交设计的3个因素,每个因素设置4个水平,水的加量为固定值,经前期的试配确定水加量为12.2%(占固体材料总量),正交设计水平及配比方案如表2、表3所示。

表2 相似材料正交设计水平

水平	A/%	B/%	C/%
1	32.50	29	3
2	37.50	32	5
3	42.50	35	7
4	47.50	38	9

表3 相似材料配比方案

组数	A/%	B/%	C/%
1	32.50	29	9
2	32.50	32	7
3	32.50	35	5
4	32.50	38	3
5	37.50	29	7
6	37.50	32	9
7	37.50	35	3
8	37.50	38	5
9	42.50	29	5
10	42.50	32	3
11	42.50	35	9
12	42.50	38	7
13	47.50	29	3
14	47.50	32	5
15	47.50	35	7
16	47.50	38	9

3 试验结果总体分析

对上述16组配比相似材料进行试验,获取各配比相似材料的水稳性指标、密度、抗压强度、弹性模量和渗透系数,其中用电子万能试验机仪器对试样的抗压强度与弹性模量进行测试,仪器加载速率为1 mm/min,测试条件为养护3 d泡水1 d,水稳性指标以样品的完整程度判断,具体标准见表4。

表 4 水稳性指标特征

水稳性指标	完整性特征
①	不散
②	基本不散,局部有掉落
③	较容易散,掉落程度严重
④	散,边缘全部散掉,仅保留中心部分
⑤	全部散,土样完全散落在水中

试验结果如表 5 所示,得到白云岩相似材料相关物理参数分布所属区间为:密度为 2.385~2.589 g/cm³、单轴抗压强度为 1.184~9.831 MPa、弹性模量为 70.7~1 019.1 MPa、渗透系数为 1.12×10⁻⁶~3.18×10⁻³ cm/s。各参数分布区间均较大,可满足多种相似材料模型试验需求,适合模型梯度范围较大。水稳性指标均为①或②,水稳性较好,基于试验目的,选择水稳性指标为①的配比。也可以根据特定试验对相似材料相关性参数需求,从试验结果中挑选相关相似材料配比。

表 5 相似材料配比正交试验结果

组数	密度 /g·cm ⁻³	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	渗透系数 /cm·s ⁻¹	水稳性指标
1	2.385	5.867	779.9	5.85×10 ⁻⁵	①
2	2.404	3.37	345.7	4.05×10 ⁻⁶	②
3	2.58	2.868	248.6	1.49×10 ⁻⁵	①
4	2.589	2.6	211.3	9.11×10 ⁻⁶	②
5	2.442	5.197	355.2	1.72×10 ⁻⁶	①
6	2.427	8.125	624.7	1.12×10 ⁻⁶	②
7	2.589	1.184	70.7	1.53×10 ⁻⁵	①
8	2.503	3.168	322.6	9.87×10 ⁻⁶	①
9	2.441	3.185	409.3	1.64×10 ⁻⁴	①
10	2.471	1.357	190.6	3.40×10 ⁻⁴	②
11	2.471	8.272	887.9	2.20×10 ⁻⁶	①
12	2.517	7.198	845.4	3.95×10 ⁻⁵	①
13	2.462	1.549	245.3	1.39×10 ⁻³	①
14	2.553	4.144	409.2	2.08×10 ⁻³	②
15	2.469	7.698	887.9	3.18×10 ⁻³	②
16	2.503	9.831	1 019.1	1.42×10 ⁻³	①

3.1 相似材料物理性质影响因素分析^[16~18]

(1) 密度影响因素敏感性分析

对密度相关试验数据求取各因素极差,如表 6,得到 B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素的极差最大,再者是 C(9 000 型超细水泥/固体材料)因素,最后是 A(40 目石英砂/固体材料)因素,故对密度的敏感性影响程度各因素从大到小排序结果为 B>C>A,由此可知,B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))为控制密度的首要因素。

表 6 白云岩相似材料密度极差分析

因素	1	2	3	4	极差
A	2.49	2.49	2.475	2.497	0.022
B	2.433	2.464	2.527	2.528	0.095
C	2.528	2.519	2.458	2.447	0.081

根据相似材料试样密度因素正交试验结果分析,得到密度各相关因素影像直观图,如图 2。从中可以看出随着 B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素增加相似材料密度不断增大,随着 C(9 000 型超细水泥/固体材料)因素增加相似材料密度不断减小,A(40 目石英砂/固体材料)因素对相似材料密度影响较小。这是由于铁粉密度最大,随着铁粉的增加,相似材料密度会相应增加;水泥密度最小,随着水泥的增加相似材料密度不断减小。

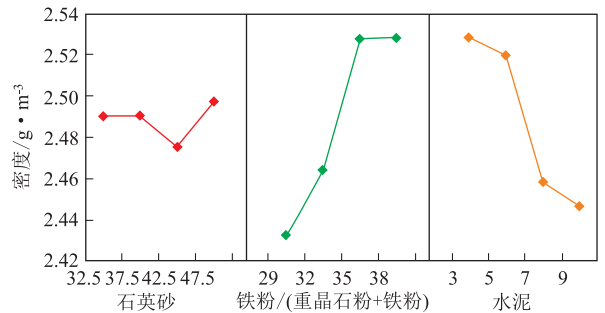


图 2 各因素对白云岩密度的影响

(2) 抗压强度影响因素敏感性分析

对抗压强度相关试验数据求取各因素极差,如表 7,得到 C(9 000 型超细水泥/固体材料)因素的极差最大,再者是 B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素,最后是 A(40 目石英砂/固体材料)因素,故对抗压强度的敏感性影响程度各因素从大到小排序结果为 C>B>A,由此可知,C(9 000 型超细水泥/固体材料)为控制抗压强度的首要因素。

表 7 白云岩相似材料抗压强度极差分析

因素	1	2	3	4	极差
A	3.676	4.419	5.003	5.806	2.13
B	3.95	4.249	5.006	7.742	3.79
C	1.673	3.341	5.866	8.024	6.351

根据相似材料试样抗压强度因素正交试验结果分析,得到抗压强度各相关因素影像直观图,如下图 3。从中可以看出随着 3 种因素的增加,相似材料抗压强度均不断增大,随 C(9 000 型超细水泥/固体材

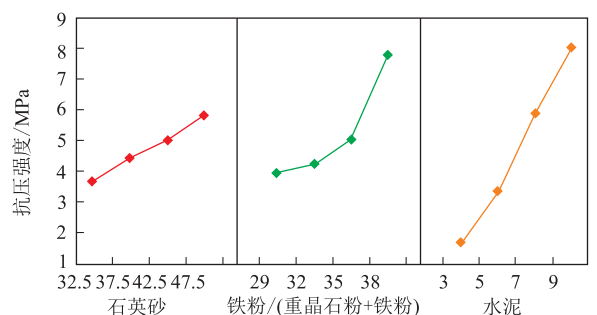


图 3 各因素对白云岩抗压强度的影响

料)因素的增加抗压强度增加最快影响效果最明显。这是由于水泥为胶结剂,加水制样本身具有很高强度,铁粉和石英砂本身也具有一定强度,含量越多相似材料强度越高。

(3) 弹性模量影响因素敏感性分析

对弹性模量相关试验数据求取各因素极差,如表 8,得到 C(9 000 型超细水泥/固体材料)因素的极差最大,再者是 A(40 目石英砂/固体材料)因素,最后是 B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素,对弹性模量的敏感性影响程度各因素从大到小排序结果为 C > A > B,这说明 C(9 000 型超细水泥/固体材料)为控制弹性模量的首要因素。

表 8 白云岩相似材料弹性模量极差分析

Table with 6 columns: 因素, 1, 2, 3, 4, 极差. Rows A, B, C.

根据相似材料试样弹性模量因素正交试验结果分析,得到弹性模量各相关因素影像直观图,如下图 4。可以看出随 C(9 000 型超细水泥/固体材料)因素的增加相似材料弹性模量呈线性增长,A(40 目石

表 9 白云岩相似材料渗透系数极差分析

Table with 6 columns: 因素, 1, 2, 3, 4, 极差. Rows A, B, C.

根据相似材料试样渗透系数因素正交试验结果分析,得到渗透系数各相关因素影像直观图,见图 5。可以看出随 A(40 目石英砂/固体材料)因素增加,相似材料渗透系数不断增长,B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素和 C(9 000 型超细水泥/固体材料)

英砂/固体材料)因素及 B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素对弹性模量影响不大。这是由于水泥为胶结剂,加水制样本身具有很高强度,强度增大则单位变形需要的应力增加,即弹性模量相应增大。

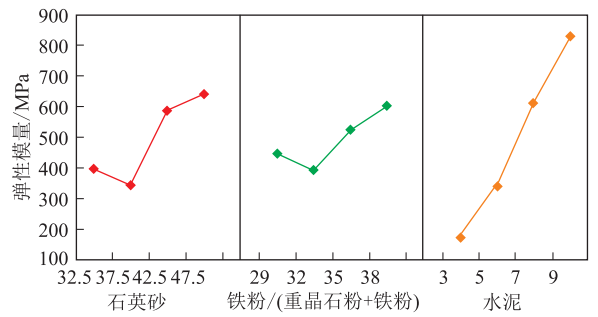


图 4 各因素对白云岩弹性模量的影响

(4) 渗透系数影响因素敏感性分析

对渗透系数相关试验数据求取各因素极差,如表 9,得到 A(40 目石英砂/固体材料)因素的极差最大,再者是 B(铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素,最后是 C(9 000 型超细水泥/固体材料)因素,对渗透系数的敏感性影响程度各因素从大到小排序结果为 A > B > C,这说明 A(40 目石英砂/固体材料)为控制渗透系数的首要因素。

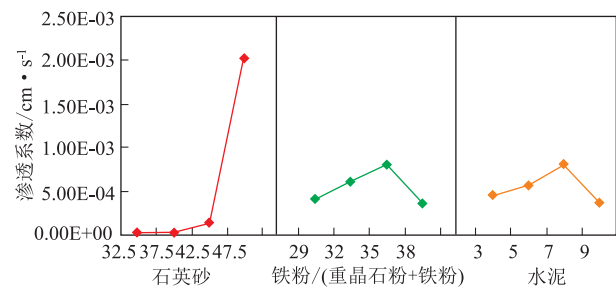


图 5 各因素对白云岩渗透系数的影响

因素对相似材料渗透系数影响相对较小。这是由于 40 目石英砂颗粒最大,能形成较大的孔隙,孔隙较大有利于水的流通,渗透系数相应提高。

3.2 相似材料配比确定

基于正交试验及分析结果,并根据模型对白云岩相似材料性质的要求,确定配比为第 3 组,相关试验参数见表 10。

4 结论

本文以正交试验为手段,以 40 目石英砂、重晶石粉、铁粉、9 000 型超细水泥为试配材料,研制出一种大型振动台模型试验白云岩相似材料,为进行振动台试验打好了材料基础。试验所获得的相似材

表 10 白云岩相似材料最终配比

Table with 10 columns: 因素/% (A, B, C), 其他成分/% (拌和水量), 粘聚力 /kPa, 内摩擦角 /°, 密度 /g · cm⁻³, 抗压强度 /MPa, 弹性模量 /MPa, 渗透系数 /m · s⁻¹.

料物理力学性质更近似于实际情况,且为工程岩体稳定性的模型试验提供了重要参考。其中正交试验得到的结论如下:

(1) 试验所选取因素对密度敏感性影响程度从大到小排序结果为 $B > C > A$, B (铁粉/(铁粉+重晶石粉))因素增加相似材料密度不断增大,随着 C (9 000型超细水泥/固体材料)因素增加相似材料密度不断减小。

(2) 试验所选取因素对抗压强度敏感性影响程度从大到小排序结果为 $C > B > A$,随着 3 种因素的增加,相似材料抗压强度均不断增大,且 C (9 000 型超细水泥/固体材料)因素的增加抗压强度增长速度最快。

(3) 试验所选取因素对弹性模量敏感性影响程度从大到小排序结果为 $C > A > B$,随 C (9 000 型超细水泥/固体材料)因素的增加相似材料弹性模量呈线性增长。

(4) 试验所选取因素对渗透系数敏感性影响程度从大到小排序结果为 $A > B > C$,随 A (40 目石英砂/固体材料)因素增加渗透系数不断增长。

(5) 试验配制相似材料物理力学参数分布区间广,适合多种材料模型试验对相似材料强度、密度、渗透系数等物理力学参数的需求条件,为研究地震作用下滑坡稳定性提供基础支撑。

参考文献

- [1] 裴向军,崔圣华,黄润秋.大光包滑坡启动机制:强震过程滑带动力扩容与水击效应[J].岩石力学与工程学报,2018,37(2):430-448.
- [2] 崔圣华,裴向军,黄润秋,等.强震过程滑带超间隙水压力效应研究:大光包滑坡启动机制[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):522-539.
- [3] 崔圣华,裴向军,黄润秋.大光包滑坡启动机制:强震过程滑带非协调变形与岩体动力致损[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):237-253.
- [4] 杨旭,等.红层软岩模型试验相似材料的配比[J].岩土力学,2016,37(8):2231-2237.
- [5] 杜应吉.地质力学模型试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.
- [6] 董金玉,等.基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):44-49.
- [7] 李光,马凤山,徐佩华.原料组对动力学相似材料性质影响的试验研究[J].工程地质报,2019,27(03):676-681.
- [8] 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.
- [9] 姚国强,言志信.岩体相似材料正交设计试验研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(4):902-910.
- [10] 刘金辉,李文泉,刘宇森,等.多孔含水岩层的相似材料配比研究[J].岩土力学,2018,39(02):657-664.
- [11] 林韵梅.实验岩石力学——模拟研究[M].北京:煤炭工业出版社,1984.
- [12] 孟祥瑞.含软弱夹层地质体强震作用下的非协调动力响应研究[D].成都理工大学,2017.
- [13] 朱凌.含软弱夹层岩质斜坡动力响应特征及失稳机理研究[D].成都:成都理工大学,2018.
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组.工程岩体实验方法标准(GBT50266-2013)[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [15] 肖杰.相似材料模型试验原料选择及配比试验研究[D].北京交通大学,2013.
- [16] 刘永莉,周文佐,郭斌,等.相似模型实验中泥灰岩相似材料研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S1):2795-2803.
- [17] 崔宁坤,王军祥,陈四利,等.泥灰岩相似材料配比试验研究[J].公路交通科技,2020,37(11):81-88.
- [18] 吴锦华,袁智洪,周泳峰.古滑坡泥灰岩模拟相似材料试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(10):81-86.

作者简介:高会会(1992—),女,中级工程师,主要从事地质灾害成因机理及防治、矿山生态修复相关研究工作。

E-mail:574102688@qq.com

通讯作者:裴向军(1970—),男,教授,主要从事地质灾害、工程边坡稳定性评价及工程治理方面的教学和研究工作。

E-mail:peixj0119@tom.com