

肖丽丽. 强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(2): 344-349. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.344

XIAO Lili. Influence of Strong Motion on the Attribute Parameters Variation of Rocks in Mountainous Areas[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 344-349. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.344

## 强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响分析<sup>①</sup>

肖丽丽

(西安翻译学院, 陕西 西安 710105)

**摘要:** 采用静力分析法分析强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响时, 忽略了岩石碎裂底部和顶部之间的相互作用, 存在对岩石密度以及其他参数属性分析结果不准确的问题。因此提出强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响分析方法。该方法通过高程控制效应能有效显示强烈震动后岩石的碎裂程度, 再将碎石间存在的卸荷和碾压力融入室内、外对原岩和碎裂岩石密度的测量结果, 最后采用蜡封法得到强烈震动后碎裂岩石的各种参数变化结果, 实现对岩石的密度、孔隙率、天然吸水率、渗透系数以及软化系数等属性参数的有效分析。实验结果说明, 所提方法对强烈震动下山地区岩石属性参数变化分析结果具有较高的准确性。

**关键词:** 强烈震动; 山区岩石; 属性参数; 高程; 密度; 蜡封法

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0344-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.344

## Influence of Strong Motion on the Attribute Parameters Variation of Rocks in Mountainous Areas

XIAO Lili

(Xi'an Fanyi University, Xi'an 710105, Shaanxi, China)

**Abstract:** When using the traditional static analysis method to analyze the influence of strong motion on the variation of the attribute parameters of rocks in mountainous areas, the interaction between the bottom and top of the rock fragment is neglected, which leads to inaccurate analysis results of rock density and other attribute parameters. Therefore, in this study, an influence analysis method is proposed to analyze the influence of strong motion on the attribute parameters variation of rocks in mountainous areas. With the proposed method, the degree to which the rock was subjected to strong motion can be effectively shown through the elevation control effect. Indoor and outdoor measurements of the original and fragmented rock densities are carried out, and the unloading and pressure between gravels are added to the measurement results. Then the variation in the results of various parameters such as density, porosity, natural water absorption rate, permeability coefficient, and softening coefficient of rock are obtained with the wax-coated method, and then, they can be effectively analyzed. The experimental results that show the proposed method is highly accurate for analyzing the attribute parameters variation of rocks in mountainous areas subjected to strong motion.

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 2015年的项目陕西省文化厅课题(2015sy057)

作者简介: 肖丽丽(1984—), 女(蒙古族), 山东青岛人, 硕士, 讲师, 研究方向: 组合结构抗震。E-mail: xlluoxue@163.com。

**Key words:** strong motion; rocks in mountainous area; attribute parameters; elevation; density; wax-coated method

## 0 引言

强烈地震作用会造成山区岩石发生大规模的碎裂问题,尤其在汶川地震发生后,暴发出大规模的地质次生灾害,如岩体碎裂造成的道路塌方问题。因此岩石的碎裂问题得到越来越多的关注,从而使许多专家学者对强烈地震后岩石属性参数变化和动力成因展开了深入探讨<sup>[1]</sup>。过去采用静力分析法分析强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响时,忽略了岩石碎裂底部和顶部之间的相互作用,从而造成对岩石属性参数变化的影响分析结果不够准确。本文研究一种强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响分析方法,以期提升岩石参数属性分析结果的精度。

## 1 强烈震动对山区岩石属性参数变化的影响分析

分析强烈震动对山区岩石属性参数变化影响主要是从岩石的密度角度进行分析。密度是岩石的一种突出属性,本文采取研究岩石密度变化的方法来实现对山区岩石其他参数属性变化的有效分析<sup>[2]</sup>,根据不同地理位置岩石的分布规律对岩石的密度属性进行研究,分析地震前后岩石属性参数的变化情况。

### 1.1 高程控制效应

山区岩石在强烈地震影响下普遍会发生不同程度的碎裂现象,岩石的碎裂会导致其某些参数属性的变化。岩石的碎裂化可以通过高程进行显示,山区岩石损伤碎裂化程度存在显著的高程控制效应<sup>[3]</sup>,表1为不同高程下岩石碎裂化统计表。该表依照岩石碎裂化的高程分布,从中可以看出岩石碎裂化具有从低到高受损程度逐渐提升的特征,碎裂程度不同的岩石其参数属性的变化也有所不同(图1)。

### 1.2 山区岩石属性参数变化分析

分析强烈地震对山区岩石属性参数变化的影响,不能仅仅依靠高程控制效应分析得到岩石的碎裂化效果<sup>[4]</sup>,还需要分析岩石的物理属性,岩石的物理结构和属性共同影响着岩石的属性参数变化。

表1 岩石碎裂化高程控制统计表

Table 1	Statistics of height control of rock fragmentation	
钻孔名称	高程/m	岩石损伤碎裂化深度/m
ZK1	1 985	1.1
ZK2	2 033	3.7
ZK3	2 087	16.6

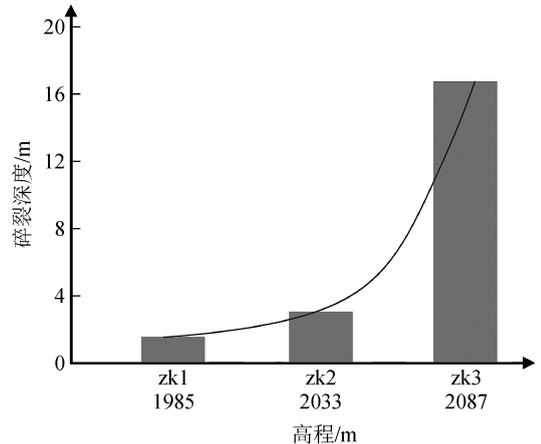


图1 岩石碎裂化高程效应

Fig.1 Rock fragmentation elevation effect

### 1.2.1 山区原岩密度和物理属性参数检测

实地选取某山区岩石进行密度检测。密度检测分为室内和室外检测,待检测密度岩石为形状完整的大岩石块。对其进行室外密度测试步骤如下:

(1) 利用电子称称量待检测密度岩石质量(kg)。由于岩石为不规则形状,采用排水法测量岩石体积<sup>[5]</sup>:将系上细绳的岩石缓慢放入装满水的容器中,随着放入容器中岩石体积的增大,排出容器外水的体积也逐渐变大,当岩石完全浸入水中时,称量排出全部水的质量,根据水质量和已知水的密度计算排出水的体积,即为岩石的体积( $v/m^3$ )。图2为室外测量岩石样本。



图2 室外测量岩石密度样本

Fig.2 Rock density samples used in outdoor test

(2) 根据步骤(1)称量得到的岩石质量和计算得到的岩石体积计算岩石密度( $kg \cdot m^{-3}$ );

(3) 重复上述计算过程,采集多个山区待检测岩石样本,得到岩石密度平均值。

这种粗劣的计算方法由于操作过程简单,计算过程符合物理事实,且选取的检测样本为规格较大的原石,因此密度计算结果的可信度较高。

通常采用蜡封法测量室内岩石密度<sup>[6]</sup>。首先取上述待测岩石的一部分,经过高温烘烤 24 小时后在该岩石上系一条细绳,称其质量  $g_s$ , 然后将其缓慢地放入融化的蜡液当中,使岩石外表面均匀覆盖一层蜡,待蜡冷却后称其质量为  $g_1$ , 接下来将密封好的岩石放至蒸馏水中,测量岩石和水的共同质量  $g_2$ , 可以得到岩石的干溶重( $\gamma_d$ ) 计算公式:

$$\gamma_d = \frac{g_s}{g_1 - g_2 - \frac{g_1 - g_2}{\gamma_n}} \quad (1)$$

式中: $\gamma_n$  为蜡的容重( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )。室外进行岩石密度测量充分考虑到岩石结构和裂缝等特性,而室内

测量结果精确性较高,将两者的测量结果相结合<sup>[7]</sup>,得到山区原岩的密度为  $2.76 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。基于获取的原岩密度,采用合理方法获取原岩的物理性质属性参数(表 2)。

### 1.2.2 山区碎裂岩石密度和物理属性参数检测

对地震影响造成的山区碎裂岩石的密度检测同样分为室内和室外两种。室外进行密度检测分为如下几个步骤:

(1) 利用一些工具收集碎裂的岩石,进行碎石土现场密度检测,于碎石附近挖掘大小约为  $5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  的测试坑<sup>[8]</sup>。图 3 为密度测试坑。

(2) 对待检测密度碎石的质量进行测量<sup>[9]</sup>,据此计算碎石密度。

(3) 由于山区岩石碎裂情况较严重,挖掘一个

表 2 原岩的物理属性参数

Table 2 Physical property parameters of the original rock

密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率 /%	天然吸水率 /%	渗透系数 /%	软化系数	抗冻系数
27.4~27.9	0.4~0.6	0.11~0.15	$1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-12}$	0.84	-

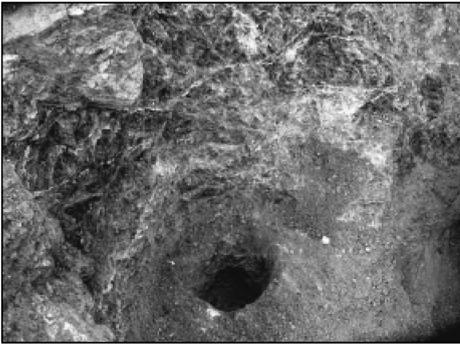


图 3 密度测试坑  
Fig.3 Density test pit



图 4 测试坑体积测量

Fig.4 Test pit volume measurement

法(图 4)。

(4) 依照上述步骤,对山区岩石的不同碎裂部位进行密度检测,计算不同碎裂部分的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

室内检测碎石密度方法同样为蜡封法。碎裂岩石的采样需要从原石的不同部位进行:强震动碾压卸围压区获取碎石应依照岩石走向<sup>[10]</sup>、高程和深度实施取样;震动无碾压围压区和弱震动无碾压围压区仅依照深度实施取样。将室内测得的岩石密度与室外测得结果相结合,取二者的均值(图 5)。图中的 2 540 m 高程点位于震动无碾压围压区<sup>[11]</sup>, 高程 2 500 m 测试点位于弱震动无碾压围压区,其

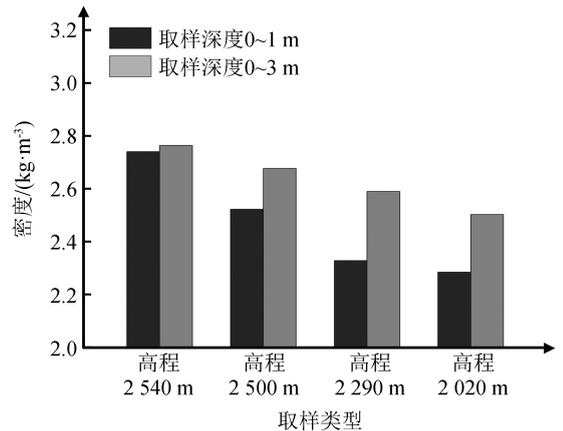


图 5 碎裂岩石密度室内检测结果

Fig.5 Indoor test results of fractured rock density

标准的测试坑难度较高,因此难以采用直接计算的方法计算测试坑体积,只能采用向测试坑注水的方

他高程点均处于强震动碾压卸围压区。

分析图5可知,处于地表1 m内碎裂岩石的密度与高程呈同向变化,即岩石密度随高程的降低而变小,岩石密度差值较大。该现象与岩石的卸荷和碾压过程相关,因为高程相差过大,造成顶部的岩石厚度逐渐增加,导致岩石受到的负荷载不断增加,同时岩石从顶部滑落到底部过程中其碾压力逐渐增

强,因此底部岩石较坚固<sup>[12]</sup>。处于碎裂岩石深处的岩石密度随高程降低变化幅度略小一些。处于同一高程位置,碎裂岩石顶部密度变化值小于底部,因为底部碎石向顶部释放的碾压作用较强,证明卸荷和碾压可导致岩石出现碎裂<sup>[13]</sup>,导致岩石的密度发生变化。基于获取的震后碎石密度,采用合理方法获取震后碎石的物理性质属性参数(表3)。

表3 震后碎石的物理属性参数

Table 3 Physical properties of fragmented rock after earthquake

容重	孔隙率/%	天然吸水率/%	渗透系数/%	软化系数	抗冻系数
2.35~2.81	0.5~0.7	0.29~3.3	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-6}$	0.65	-

## 2 实验分析

为验证本文方法是否可以对强烈震动下山区岩石属性参数变化的影响做出准确分析,实证分析某地震多发地区在遭受某次强烈地震后岩石属性参数的变化情况。采用本文方法对某塌方严重山区的岩石属性进行分析,为突出本文方法的分析效果,将传统静动力分析方法的分析结果作为对比。图6为该山坡的岩石碎裂图像。

分析该图可知,该山区处于不同位置的岩石其碎裂程度不同。为确保两种方法分析的岩石参数属性都具有较高的代表性<sup>[14]</sup>,从该山坡的顶部、中部和底部的不同位置分别选取了4块岩石来分析其

密度、孔隙率、渗透系数以及软化系数。表4为采用本文方法和静力分析法得到的岩石参数属性,表5为用精密仪器测得的岩石的准确参数属性。



图6 岩石碎裂图像

Fig.6 Rock fragmentation image

表4 两种方法分析得到的岩石属性参数

Table 4 Attribute parameters of rock obtained with the two methods

采样部位	本文分析方法					静力分析方法				
	测试编号	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率/%	渗透系数/%	软化系数	测试编号	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率/%	渗透系数/%	软化系数
顶部	1	2.75	0.52	$1 \times 10^{-2}$	0.61	1	2.78	0.62	$1 \times 10^{-2}$	0.68
	2	2.76	0.53	$1 \times 10^{-2}$	0.61	2	2.57	0.68	$1 \times 10^{-2}$	0.75
	3	2.78	0.52	$1 \times 10^{-2}$	0.62	3	2.69	0.71	$1 \times 10^{-5}$	0.61
	4	2.68	0.52	$1 \times 10^{-2}$	0.62	4	2.57	0.68	$1 \times 10^{-2}$	0.75
中部	5	2.62	0.56	$1 \times 10^{-2}$	0.61	5	2.87	0.64	$1 \times 10^{-4}$	0.58
	6	2.51	0.58	$1 \times 10^{-4}$	0.62	6	3.01	0.84	$1 \times 10^{-5}$	0.64
	7	2.47	0.61	$1 \times 10^{-4}$	0.63	7	3.24	0.62	$1 \times 10^{-5}$	0.62
	8	2.47	0.61	$1 \times 10^{-4}$	0.63	8	2.87	0.64	$1 \times 10^{-4}$	0.58
底部	9	2.35	0.68	$1 \times 10^{-5}$	0.63	9	2.68	0.87	$1 \times 10^{-8}$	0.84
	10	2.36	0.68	$1 \times 10^{-5}$	0.64	10	2.67	0.94	$1 \times 10^{-5}$	0.86
	11	2.38	0.68	$1 \times 10^{-5}$	0.65	11	3.12	0.56	$1 \times 10^{-5}$	0.77
	12	2.38	0.68	$1 \times 10^{-5}$	0.65	12	2.68	0.87	$1 \times 10^{-5}$	0.84

分析表4数据可知,采用本文方法分析得到的山区岩石不同位置的属性参数有所差异,从顶部到底部岩石的参数属性变化有迹可循,其密度逐渐减少;岩石的碎裂程度较重,碎裂化程度越高岩石的孔隙率和渗透系数越高,软化系数逐渐变大,存在显著

的变化规律。而采用静力分析法分析得到的结果显示,不同位置岩石的密度变化值较大,其他属性参数的波动也较大,无明显的变化规律。

为证明本文方法分析结果的正确度,采用精密的测量仪器对上述实验中的岩石样本进行岩石属性

参数的精确测量。精密仪器测得的岩石属性参数结果列于表5。

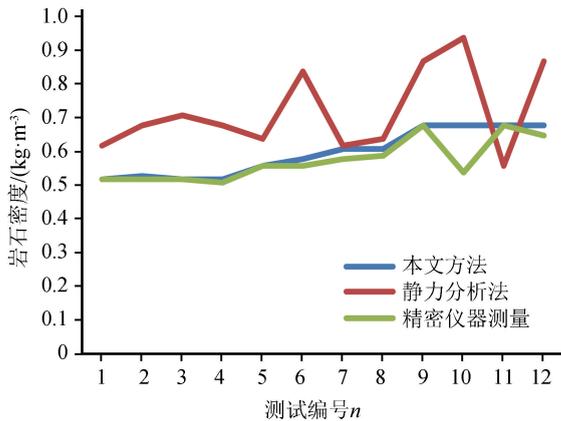
对比分析表4与表5的数据可以得出:精密仪器测量结果与本文方法分析的岩石参数结果相差较小,与静力分析法的分析结果则相差较大。为更加清晰准确地表示本文方法和静力分析法与仪器测量结果的差距<sup>[15]</sup>,用图7表示三种方法测得的岩石密度和岩石孔隙率。

从图7可以清晰地看出,采用本文方法得到的岩石的密度和孔隙率都与精密仪器的测量结果相接近,大部分位置下测得的结果几乎相同;静力分析法分析结果的波动较大且从图像上看与仪器测量曲线相距甚远,因此可以证明本文方法分析强烈震动对山区岩石属性参数变化结果的准确性较好,可信度高。

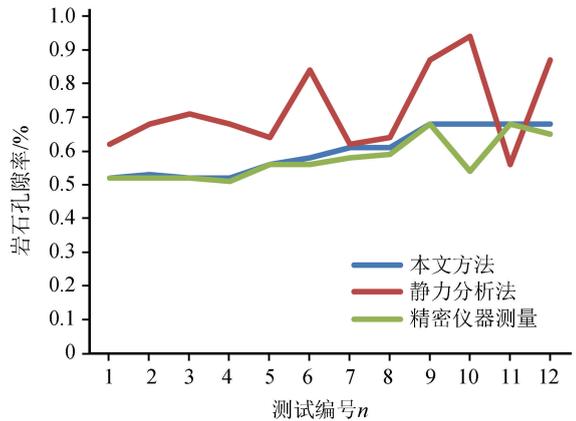
表5 精密仪器测得的岩石参数属性

Table 5 Attribute parameters of rock measured by precision instruments

测试编号	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率 /%	渗透系数 /%	软化系数	
顶部	1	2.75	0.52	$1 \times 10^{-2}$	0.61
	2	2.76	0.52	$1 \times 10^{-2}$	0.6
	3	2.76	0.52	$1 \times 10^{-2}$	0.61
	4	2.68	0.51	$1 \times 10^{-2}$	0.62
中部	5	2.56	0.56	$1 \times 10^{-4}$	0.62
	6	2.51	0.56	$1 \times 10^{-4}$	0.62
	7	2.51	0.58	$1 \times 10^{-4}$	0.61
	8	2.47	0.59	$1 \times 10^{-4}$	0.63
底部	9	2.35	0.68	$1 \times 10^{-5}$	0.62
	10	2.36	0.54	$1 \times 10^{-5}$	0.63
	11	2.39	0.68	$1 \times 10^{-5}$	0.64
	12	2.39	0.65	$1 \times 10^{-5}$	0.65



(a) 岩石密度



(b) 岩石孔隙率

图7 三种方法测得的岩石密度结果及岩石孔隙率

Fig.7 Results of rock density and porosity measured by three methods

### 3 结论

本文提出的强烈震动对山区岩石属性参数变化分析方法能有效提高对岩石属性参数分析的准确性,增强分析结果的可信度。

### 参考文献(References)

- [1] 任连伟,肖扬,顾红伟.砂土介质中多类型土压力盒标定试验[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):155-159.  
REN Lianwei, XIAO Yang, GU Hongwei. Experimental Study on Calibration Tests of Earth Pressure Cells in Sand Soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(2): 155-159.
- [2] 武泽华,陈开圣.压实红粘土抗剪强度特性研究[J].贵州大学学报(自然版),2016,33(4):118-122.  
WU Zehua, CHEN Kaisheng. Study on Shear Strength of Compacted Red Clay[J]. Journal of Guizhou University (Natural

Science), 2016, 33(4): 118-122.

- [3] 彭刚,周东红,张平平,等.基于岩心测试的岩石物理参数敏感性分析——以沙南凹陷古近系不同相带碎屑岩为例[J].中国海上油气,2016,28(3):57-61.  
PENG Gang, ZHOU Donghong, ZHANG Pingping, et al. Rock Physical Sensitivity Analysis Based on Core Sample Testing: A Case of Paleogene Clastic Reservoir under Different Sedimentary Environments in Shan'an Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(3): 57-61.
- [4] 戴峰,魏明东,徐奴文,等.岩石断裂韧度 CCNSCB 方法渐进破坏机制与无量纲应力强度因子宽范围标定[J].岩土力学,2016,37(11):3215-3223.  
DAI Feng, WEI Mingdong, XU Nuwen, et al. Progressive Fracture Mechanism of CCNSCB Rock Fracture Toughness Specimens and Calibration of Wide-range Dimensionless Stress Intensity Factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3215-3223.
- [5] 王秀,卢海燕,占伟伟,等.基于 TCD1711DG 的信号采集系统

- 设计[J].现代电子技术,2016,39(19):92-94.
- WANG Xiu, LU Haiyan, ZHAN Weiwei, et al. Design of Signal Acquisition System Based on TCD1711DG[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(19): 92-94.
- [6] 李俊芳, 胡海峰, 李威. 山区采动滑移对地表移动变形的影响分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(6): 204-207.
- LI Junfang, HU Haifeng, LI Wei. Effect Analysis of Slippage Caused by Underground Mining on Surface Movement and Deformation[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(6): 204-207.
- [7] 唐峰, 李德建. 山区高墩大跨度连续刚构桥稳定性与参数影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(3): 506-511.
- TANG Feng, LI Dejian. Stability of Long-span Continuous Rigid-frame Bridge with High Piers in Mountain Areas in Different Construction Stage and Relevant Parameter Influence Analysis[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(3): 506-511.
- [8] 刘书会, 王长江, 罗红梅, 等. 泥页岩岩石物理参数测试与分析[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(6): 16-21.
- LIU Shuhui, WANG Changjiang, LUO Hongmei, et al. Research on Measurement and Analysis of Shale Rock Physical Parameters[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 16-21.
- [9] 孔宇阳, 李珊. 地震荷载作用下岩石边坡稳定性的拟动力分析及可靠度研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 169-176.
- KONG Yuyang, LI Shan. Pseudo-dynamic Analysis and Reliability Study of Stability of Rock Slope under Seismic Load[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 169-176.
- [10] 曹文贵, 杨尚, 张超. 考虑弹性模量变化的岩石统计损伤本构模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 42-48.
- CAO Wengui, YANG Shang, ZHANG Chao. A Statistical Damage Constitutive Model of Rocks Considering the Variation of the Elastic Modulus[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(3): 42-48.
- [11] 于怀昌, 赵阳, 刘汉东, 等. 三轴应力作用下水对岩石应力松弛特性影响作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 313-322.
- YU Huaichang, ZHAO Yang, LIU Handong, et al. Experimental Study of Influence of Water on Stress Relaxation of Rock under Triaxial Stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 313-322.
- [12] 魏嘉磊, 刘善军, 吴立新, 等. 含孔岩石双轴加载过程声发射多参数特征对比分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 1017-1025.
- WEI Jialei, LIU Shanjun, WU Lixin, et al. Comparative Analysis on Different AE Parameters in Biaxial Loading of Hole Rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(6): 1017-1025.
- [13] 孔宇阳, 廉超, 陈新强. 土的天然密度对地表地震动参数的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(8): 797-801.
- KONG Yuyang, LIAN Chao, CHEN Xinqiang. The Effect of Natural Density of Soil on Ground Motion Parameters[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(8): 797-801.
- [14] 牛懿炜, 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.
- NIU Yiwei, ZHOU Xiaoping, QIAN Qihu. Three-dimensional Stability Assessment of Rock Slopes Based on Random Fields[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2017, 39(3): 129-137.
- [15] 黄兴建, 付小敏, 沈忠, 等. 三轴循环荷载下岩石动态特性参数研究[J]. 中国测试, 2016, 42(7): 117-122.
- HUANG Xingjian, FU Xiaomin, SHEN Zhong, et al. Study on Dynamic Characteristic Parameters of Rock under Triaxial Cyclic Loading[J]. China Measurement & Testing Technology, 2016, 42(7): 117-122.