

闽南风化凝灰熔岩强度特性的试验研究

魏国安

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 地质路基处, 陕西 西安 710043)

摘要:对福建闽南地区泉三高速公路隧道围岩中的风化凝灰熔岩进行了吸水率和单轴抗压强度试验,定量分析了风化程度对岩石单轴抗压强度和吸水特性的影响,并得出了不同风化程度的凝灰熔岩其吸水率与烘干状态和饱和状态下的单轴抗压强度之间的非线性关系式。该式可以为类似条件下岩石强度估算提供参考和借鉴。

关键词:岩石力学;凝灰熔岩;强度;风化程度

中图分类号: TU 459+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)03-0625-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0625

Experimental Analysis on the Strength Properties of Weathering Tufflava in the South Fujian Province

WEI Guo-an

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xian shanxi 710043, China)

Abstract: As an important component of the Mesozoic volcanic rock in China, tufflava is widely distributed in the provinces of Guangxi, Fujian, Zhejiang, and Guangdong, and in Mesozoic volcanic basins of the Middle to Lower Yangtze River area. Because of its special material composition and structure construction, tufflava is easy to weather under all kinds of exterior geological agents, such as water and atmospheric conditions. Usually many construction projects, especially tunnel excavations, will inevitably pass through this kind of rock mass. Therefore, it is very important to study the property of weathering tufflava for the design, construction, and stability analysis of tunnel engineering, as well as other engineering projects.

This paper researches weathering tufflava, which belongs to the tunnel surrounding the rock of the Fujian Quanshan Highway in the south Fujian province. Uniaxial compressive strength and water absorption experiments are conducted on tufflava with different weathering degrees (strong weathering, weak weathering, slight weathering, and unweathering tufflava) with the intent to quantitatively analyze the effect of the degree of tufflava weathering on the uniaxial compressive strength and water absorption characteristics. The process for the experiments can be described as follows. Based on the standard test method for engineering rock masses, 38 pieces of standard samples (50 mm × 50 mm × 100 mm) were prepared, with the drying and saturation processes strictly performed by the standard. There are two ways, boiled saturation and natural saturation, to saturate tufflava with different weathering degrees in water absorption experiments. In addition, strength tests of tufflava with different weathering degrees under air-drying and saturated conditions were conducted by the model YAW-2000 pressure tester. During the strength tests, we chose load control mode and set the maximum axial compression to 1 000 kN and the loading

speed to 0.75 MPa/s. The relationship between water absorption and the weathering degree under the conditions of boiled saturation and natural saturation were obtained. In addition, the relationship between strength and weathering degree under the conditions of air-drying and saturation were also obtained. It was found that the degree of weathering has a significant effect on the water absorption property and uniaxial compressive strength. The stronger the weathering degree is, the higher the water absorption shows, and the smaller the uniaxial compressive strength is.

Finally, we fit the analysis of the uniaxial compressive strength and water absorption based on the data which has also been studied by using logistic regression models. The results show that the uniaxial compressive strength of tufflava with different weathering degrees under air-drying and saturation conditions has a nonlinear relationship with water absorption. The maximum error is 14%, which can completely meet the project accuracy requirements. This non-linear relationship formula can be applied to strength estimations of rocks similar to the weathering tufflava in this paper.

Key words: rock mechanics; tufflava; strength; weathering degree

0 引言

众所周知,岩块的单轴抗压强度是一个用来评价岩块力学性质的最简单和最基本的指标,是岩石分类、确定破坏判据以及工程设计时的一个重要的力学特性参数。由于单轴抗压强度这一指标较易获得,使用广泛、方便,且与抗拉和抗剪强度关系密切,如抗拉强度一般为它的3%~30%,抗剪强度为它的7%~15%^[1],所以在工程中得到广泛应用。

多年来,国内外学者在对不同岩石的强度特性等方面开展了持续深入的研究工作,并取得了较多研究成果。S. Okubo等^[2]利用自行研制的具有伺服控制系统的刚性试验机完成了大理岩、砂岩、安山岩、凝灰岩和花岗岩的单轴压缩曲线的全过程测试;Richard A. Schultz和Qizhi Li^[3]对美国内华达州Yucca山凝灰熔岩进行单轴压缩试验,计算出了其破坏时的峰值强度和弹性模量;Lajtai等^[4]详细讨论了应变速率对脆性石灰岩和延性盐岩等岩石的强度特性;陈宗基^[5]结合岩石的流变试验详细讨论了岩石的长期强度的概念,他认为存在一临界强度 f_3 ,当压力 $\sigma < f_3$ 时,岩石只产生蠕变但不至于破坏;当 $\sigma > f_3$ 时,岩石将产生加速蠕变,直至破坏。陈宗基教授称 f_3 为岩石的长期强度。吴绵拔^[6]采用气-液式压缩联动系统的快速加载机,在加载速率为 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内对两种花岗岩的单轴抗压和抗拉强度特性进行了试验研究;刘雄^[7]采用自制的TQ-200岩石剪切流变仪对风化角砾土、炭质泥岩、煤-粘土混合物等采用单体试验方法对他们的抗剪强度特性进行了研究;李永盛^[8]采用Instron-1345型电液伺服刚性试验机对

55块红砂岩试件进行了9级不同应变加载速率下的单轴压缩室内测试,定量分析了应变速率对单轴抗压强度、峰值应变和破裂形式等力学性态的影响;徐宏发^[9]对泥制板岩进行了单轴压缩蠕变试验,讨论了它们的强度和弹性模量的时间效应问题;尤明庆等^[10]对岩石试样单轴压缩试验的破坏形式及其承载力降低的主要原因进行了较深入的研究和探讨;彭柏兴等^[11]对白垩系泥质粉砂岩进行了单轴抗压试验、载荷试验和高压旁压试验的对比研究,并提出利用岩石单轴抗压强度来估算嵌岩桩承载力的修正公式;梁卫国等^[12]通过单轴压缩试验对岩盐的强度特性进行了研究;刘江等^[13]通过单轴压缩等试验也对盐岩的短期强度和变形特性进行了研究;刘学增等^[14]结合深圳莲盐高速公路隧道围岩中的II~V级凝灰熔岩进行了双轴剪切流变试验,通过试验结果分析和模型辨识,得到不同围岩级别凝灰熔岩的剪切流变规律和流变模型;王平等^[15]对黄土层下覆强风化岩动弹性模量和阻尼比进行了试验研究,获得了在小应变情况下,风化岩体的动应力与动应变关系为明显的非线性弹性关系,基本符合双曲线型模型。

本文依托福建闽南地区泉三高速公路泉州段新岭格隧道的工程实践,为了更好的为闽南凝灰熔岩地区与隧道工程的设计、施工和稳定性分析及科学研究提供数据参考和试验依据,针对已有研究对闽南地区凝灰熔岩强度研究的不足,对风化凝灰熔岩的水理和强度特性的进行系统的试验研究。

1 岩性与试验概述

1.1 闽南凝灰熔岩的岩性特征

凝灰熔岩是我国中生代火山岩的重要组成部分,在我国桂、闽、浙、粤等东南大陆和长江中下游中生代火山岩盆地内广泛分布。在福建闽南地区凝灰熔岩也大量发育,这类岩石晶屑含量一般为 30%~40%,其中碱性长石为 11%~12%,斜长石为 8%~11%,以钠一更长石为主;石英为 11%~14%,粗晶粒,具强熔蚀现象,龟裂纹发育;黑云母 0.4%~1%,弱一中等暗化,晶屑与基质比值约为 34:66;常见副矿物主要有磁铁矿、磷灰石等^[16]。晶屑粒度大体上可分为四级:>2 mm, 2~1 mm, 1~0.5 mm 和 <0.5 mm,多形成连续不等粒碎屑结构。岩石的胶结物为玻质熔岩,偶见霏细结构。

由于这类岩石具有的特殊矿物和胶结物成分,加之成岩过程先后经历了岩浆结晶分异、熔离作用和岩浆爆溢喷发流动侵位并伴随内部结晶相矿物和熔离体的碎裂等三个复杂阶段,因此闽南凝灰熔岩细微解理、裂隙较发育,结构较破碎,并易受水、温度和大气等外地质营力的侵蚀作用发生风化。

从岩类学来讲,凝灰熔岩是熔岩与火山碎屑岩之间的一种过渡性岩类,具有由熔离条状体组成的流动构造和大量碎裂状晶屑所组成的连续不等粒碎屑结构,有别于喷溢作用所形成的熔岩。这类岩石不含玻屑、浮岩屑、火山岩等火山碎屑物质,主要由熔岩物质胶结大小不等和形态各异的熔离条状体构成。

福建闽南地区凝灰熔岩的地质特征可概括如下^[17]:(1)多呈岩席、岩被或侵出岩穹和脉状体产出,有的则充填于火山通道中,岩席和岩被面积达数十至数百平方公里,产状平缓,常有近直立柱状节理,岩性单一。(2)剖面结构单一,除下部或边部火山碎屑成分稍杂,发育流动构造外,一般整个剖面火山碎屑的种类、含量及基质成分变化不大。(3)岩石组合较简单。(4)流动构造多发育于岩被下部或岩穹边缘的玻基或隐晶质基质的岩石中,基质结构较粗时消失。(5)常发育有良好的柱状节理,特别是缓倾斜乃至平卧柱状节理。

1.2 试验概述

试验所用凝灰熔岩试件取自闽南泉三高速新岭格隧道,共制得 38 块 50 mm×50 mm×100 mm 的长方体标准试件,试样精度及烘干和饱水操作均按《工程岩体试验方法标准》^[18]进行控制。强度试验采用 YAW-2000 型微机控制全自动恒应力压力试验机进行,设定最大轴压 1 000 kN。采用荷载控制

方式,加载速度为 0.75 MPa/s。

2 试验结果及其分析

试验中按岩石风化程度不同将试样分为强风化、弱风化、微风化、未风化等 4 组进行结果对比。

2.1 风化程度对岩石吸水率的影响

表 1 是试件在煮沸饱和和自然浸水饱和状态下的吸水率,看出在自然浸水饱和状态下,强风化凝灰熔岩的吸水率是弱风化的 2.4 倍,是微风化的 12.1 倍,是未风化下的 36.4 倍;在煮沸饱和状态下,强风化凝灰熔岩的吸水率是弱风化的 2.5 倍,是微风化的 11 倍,是未风化下的 26.2 倍。可以看出,随着凝灰熔岩风化程度的减弱,其吸水率随之降低,反之越

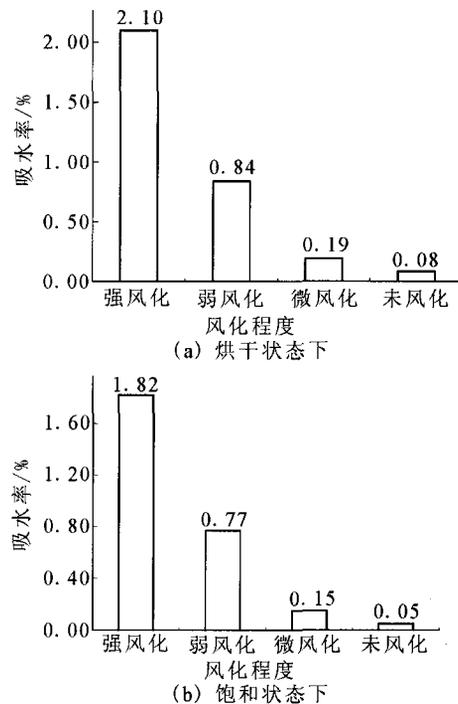


图 1 煮沸饱和状态下吸水率和风化程度的关系
Fig. 1 Relation between water absorption and weathering under boiled saturation

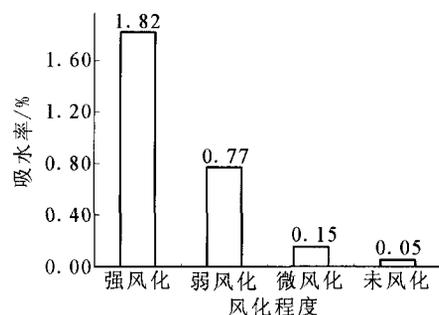


图 2 自然浸水饱和状态下吸水率和风化程度的关系
Fig. 2 Relation between water absorption and weathering under natural saturation conditions

高。韩宝平等^[19]认为,随着岩石风化程度的增强,岩石的有效空隙度和平均空隙直径会增大,显然这一认识与本文风化凝灰熔岩吸水率的试验结果相一致。

2.2 风化程度对岩石单轴抗压强度的影响

抗压强度受到很多因素的影响与制约。这些因素大体可分为两类:其一是岩石本身因素的影响,例如矿物成分、颗粒大小、胶结情况、生成条件、层理结构、容重、含水量、温度及风化程度等;其二是试验条件因素的影响,例如试件几何尺寸、试件加工情况、

表 1 不同风化程度下的凝灰熔岩吸水率试验结果统计表

风化程度	编号	特征描述	吸水率/%		吸水率平均值/%	
			自然浸水	煮沸饱和	自然浸水	煮沸饱和
强风化	1-1		2.14	2.5		
	1-2	褐色,白色	1.31	1.54		
	1-3	和青色颗粒	1.4	1.64		
	1-4	渲染,矿物	2.42	3.14		
	1-5	颗粒大小均	2.39	2.7		
	1-6	匀	1.74	1.94		
	1-7		1.5	1.71	1.82	2.10
强风化	2-1		2.02	2.27		
	2-2	褐色,矿物 颗粒大小均 匀	1.25	1.45		
	2-3		2.56	2.81		
	2-4		1.59	1.85		
	2-5		1.87	2.12		
	2-6		1.41	1.6		
2-6			1.41	1.6		
弱风化	3-1		0.8		0.84	
	3-2	灰白色,红	0.55		0.64	
	3-3	色渲染,矿	0.78	0.77	0.84	0.86
	3-4	物颗粒大小	0.73		0.82	
	3-5	均匀	1.08		1.09	
	3-6		0.72		0.8	
微风化	4-1		0.17	0.22		
	4-2	青灰色,矿	0.19	0.22		
	4-3	物颗粒大小	0.11	0.15	0.15	0.19
	4-4	均匀	0.15	0.21		
	4-5		0.14	0.18		
未风化	5-1		0.03	0.06		
	5-2	黑褐色,灰 白色~黄色 颗粒渲染, 矿物颗粒大 小均匀	0.03	0.05		
	5-3		0.03	0.06		
	5-4		0.01	0.04		
	5-5		0.03	0.05		
	5-6		0.04	0.07		
	5-7		0.03	0.05		
	5-8		0.03	0.05	0.05	0.08
5-8			0.03	0.05	0.05	0.08
未风化	6-1		0.11	0.13		
	6-2	青色,绿色	0.11	0.14		
	6-3	颗粒渲染,	0.06	0.07		
	6-4	矿物颗粒大	0.08	0.1		
	6-5	小均匀	0.06	0.07		
	6-6		0.08	0.11		

压力机压头与试件之间的摩擦、加载速率及周围环境(如温度)等。限于工程要求和实验条件的客观条件制约等,本次试验中将主要考虑风化程度对其强度的影响。

表 2 不同风化程度下的凝灰熔岩单轴抗压强度试验结果统计表

风化程度	编号	试件状态	强度/MPa	平均强度/MPa
强风化	1-1		27.29	
	1-3		54.77	
	1-5		32.99	
	1-7	烘干	54.95	41.44
	2-1		44.48	
	2-3		31.1	
	2-5		44.53	
	1-2		28.51	
	1-4		22.98	
	1-6	饱和	23.71	29.42
弱风化	2-2		39.65	
	2-4		23.39	
	2-6		38.29	
	3-1		75.63	
	3-3	烘干	47.82	64.75
	3-5		70.79	
	3-2		69.81	
	3-4	饱水	61.32	59.56
	3-6		47.55	
	微风化	4-1		105.36
4-3		烘干	68.21	92.25
4-5			103.19	
4-2			59.68	
4-4		饱水	78.96	69.32
5-1			169.83	
5-3			195.39	
5-5			34.81	
5-7		烘干	40.67	113.91
6-1			113.74	
未风化	6-3		138.23	
	6-5		104.67	
	5-2		52.69	
	5-4		58.89	
	5-6		97.71	
	5-8	饱和	116.77	87.61
	6-2		97.14	
	6-4		114	
	6-6		76.1	

表 2 显示试件分别在烘干和饱水状态下的强度和各组平均强度。由表 2 结果可知,烘干状态下,弱风化凝灰熔岩的单轴抗压强度平均值是强风化的 1.6 倍,微风化凝灰熔岩的单轴抗压强度平均值是强风化的 2.2 倍,未风化的是强风化的 2.8 倍;煮沸饱和状态下,弱风化凝灰熔岩的单轴抗压强度平均值是强风化的 2.0 倍,微风化的是强风化的 2.4 倍,

未风化的是强风化的 3.0 倍。可以看出风化程度对岩石试件的强度特性有很大的影响, 风化程度越高, 强度越小, 风化程度越弱, 强度越大。由于风化作用消弱或破坏了原有岩石的粒间连接和晶粒本身, 故随着风化程度的增强, 岩石的强度的将逐渐降低, 论文的这一试验结果是较为符合实际的。

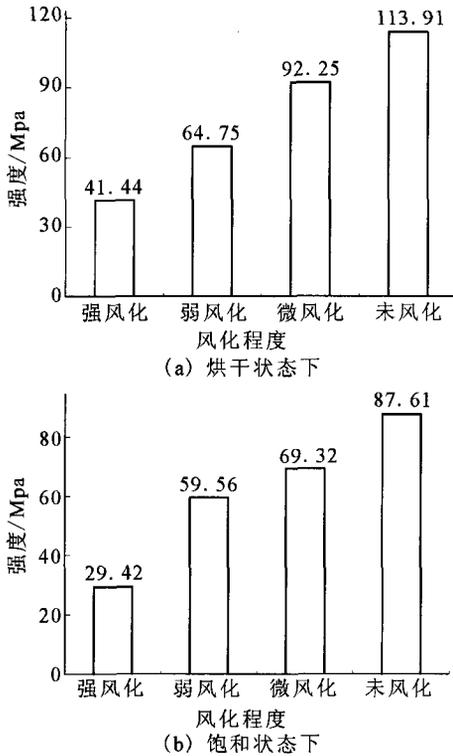


图 3 烘干状态下强度和风化程度的关系

Fig. 3 Relation between strength and weathering under air-drying conditions

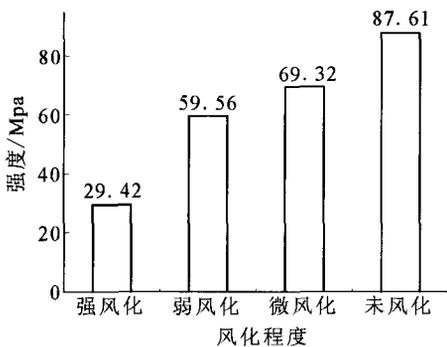


图 4 饱和状态下强度和风化程度的关系

Fig. 4 Relation between strength and weathering under saturation conditions

2.3 不同风化程度下强度变化规律分析

研究表明, 风化作用对岩石的强度有深刻而明显的影响^[20-21]。本次试验采用了不同风化程度的岩样, 笔者尝试着根据试验数据采用回归分析方法得

出一些他们的关系式。回归分析方法中主要采用了逻辑斯蒂模型, 该模型又称自我抑制性方程, 逻辑斯蒂模型的增长到一定阶段时, 其增长速率就会逐渐降低, 直到总量达到某一最大值而不会无限增大, 因此比较符合本文所研究对象的性质。

逻辑斯蒂模型在交通规划预测研究、经济变量随时间变化规律研究和油田可开采储量预测研究等方面得到了广泛应用^[22-23]。

不同风化程度下, 岩石的强度随试件含水状态不同而变化的规律可用下式表示:

$$\sigma_{ch} = \frac{200}{1 + 0.848 1E^{0.776 1w_a}} \quad (1)$$

$$\sigma_{cb} = \frac{175}{1 + 1.028 7e^{0.822 7w_{sa}}} \quad (2)$$

式中: σ_{ch} 为试件在烘干状态下的单轴抗压强度 (MPa); σ_{cb} 为试件在饱和状态下的单轴抗压强度 (MPa); w_a 为试件吸水率 (%); w_{sa} 为试件饱和吸水率 (%).

经理论计算出的强度与实测值的误差见表 3。

表 3 凝灰熔岩在烘干状态、饱和状态下的强度值

Table 3 Strength of tufflava under air-drying and saturation conditions

风化程度	烘干状态			饱和状态		
	σ_{ch} /MPa		误差 /%	σ_{cb} /MPa		误差 /%
	理论值	实测值		理论值	实测值	
不同	35.64	40.04	10.98	23.85	25.07	4.86
风化	42.68	42.5	0.43	35.48	33.78	5.03
程度	73.16	64.75	12.99	60.21	59.56	1.09
的凝	100.75	92.25	9.21	78.73	69.32	13.58
灰熔	103.03	118.88	13.33	82.31	95.75	14.04
岩	104.92	110.17	4.76	84.46	81.52	3.61

3 结论

通过对不同风化程度凝灰熔岩强度特性的试验研究, 可到如下几个方面的认识: (1) 风化程度对凝灰熔岩吸水特性影响较大。风化程度越弱, 吸水率越小, 风化程度越强, 吸水率越大。

(2) 风化程度对凝灰熔岩的单轴抗压强度影响明显。闽南凝灰熔岩风化程度越强, 则单轴抗压强度越小, 风化程度越弱, 则单轴抗压强度越大。

(3) 采用逻辑斯蒂模型可以较好的拟合风化凝灰熔岩单轴抗压强度与吸水的关系, 其最大误差约为 14%, 这一结果可满足一般工程应用的精度要求。

在实际测试中, 如果没有抗压设备或者由于工程等原因不能全部进行抗压试验时, 可采用本文的

换算公式估算岩石的单轴抗压强度。

参考文献(References)

- [1] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1998.
LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rock Mass Mechanics[M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Okubo S, Nishimatsu Y, Fukui K. Complete Creep Curves under Uniaxial Compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(1):77-82.
- [3] Richard A. Schultz, Qizhi Li. Uniaxial Strength Testing of Non-welded Calico Hills Tuff, Yucca Mountain, Nevada [J]. Engineering Geology, 1995(40):287-299.
- [4] Lajtai E Z, Scott Duncan E J, Carter B J. The Effect of Strain Rate on Rock Strength[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1991, (24): 99-109.
- [5] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1):1-8.
CHEN Zhong-ji. The Mechanical Problems of Long-term Stability of Underground Galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1):1-20. (in Chinese)
- [6] 吴绵拔. 加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2):97-106.
WU Mian-ba. The Effect of Loading Rate on the Compressive and Tensile Strength of Rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(2):97-106. (in Chinese)
- [7] 刘雄. 软岩抗剪强度单体测定法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1):631-67.
LIU Xiong. A Study of Single Specimen Test Method for Determination of Shear Strength of Softrock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(1): 631-67. (in Chinese)
- [8] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3):265-269.
LI Yong-sheng. Experimental Analysis of the Mechanical Effects of Loading Rates on Red Sandstone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 1995, 23(3):265-269. (in Chinese)
- [9] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3):246-251.
(XU Hong-fa. Time dependent Behaviors of Strength and Elasticity Modulus of Weak Rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 246-251. (in Chinese)
- [10] 尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3):292-296.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Fracture of Rock Sample and Decrement of Bearing Capacity in Uniaxial Compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3):292-296. (in Chinese)
- [11] 彭柏兴, 王星华. 白垩系泥质粉砂岩岩基强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15):2678-2683.
PANG Bai-xing, WANG Xing-hua. Research on Bearing Capacity of Cretaceous Argillaceous Siltstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15):2678-2683. (in Chinese)
- [12] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3):391-394.
LIANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Thenardite Rock Salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004 23(3):391-394. (in Chinese)
- [13] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1):3104-3109.
LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experimental Study on Short-term Strength and Deformation Properties of Salt Rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp. 1):3104-3109. (in Chinese)
- [14] 刘学增, 苏京伟, 王晓彬. 不同围岩级别凝灰熔岩剪切流变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3):190-197.
LIU Xue-zeng, SU Jing-wei, WANG Xiao-xing. Experimental Investigation on Shear Rheological Properties of Tufflava with Different Grades[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3):190-197. (in Chinese)
- [15] 王平, 王杰民, 刘红玫, 等. 黄土层下覆强风化岩动弹性模量和阻尼比试验研究 [J]. 西北地震学报, 2011, 33(3):291-294.
WANG Ping, WANG Jie-min, LIU Hong-mei, et al. Experimental Study on Dynamic Elasticity Modulus and Damping Ratio of Highly Weathered Rock which Covered by Loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 291-294. (in Chinese)
- [16] 谢家莹, 陶奎元, 谢芳贵. 试论凝灰熔岩相特征、相模式及其成因[J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(3):1-5.
XIE Jia-yin, TAO Kui-yuan, XIE Fang-gui. A Study on Tufflava Facies Feature, Model and Its Genesis[J]. Volcanology and Mineral Resources, 1995, 16(3):1-5. (in Chinese)
- [17] 俞云文, 汪庆华, 任荣富. 中国东南部中生代凝灰熔岩基本特征及成因[J]. 岩石学报, 1991, 2(1):63-69.
YU Yun-wen, WANG Qing-hua, REN Rong-fu. On General Features and Origin of Tuffolava [J]. Acta Petrologica Sinica, 1991, 2(3):63-69. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体试验方法标准 (GB/T50266-99)[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Tests Method of Engineering Rock Masses (GB/T50266-99)[S]. Beijing:China Planning Press, 1999. (in Chinese)

- [46] Schumm S A. Alluvial River Response to Active Tectonics. Active Tectonics [M]. Washington: National Academy press, 1986.
- [47] Yang C T. On River Meanders[J]. Journal of Hydrology, 1971, 13: 231-253.
- [48] Kennedy B A. Valley—side, Slopes And Climate[G]//Derbryshire E(ed). Geomorphology and Climate. London: John Wiley & Son, 1976: 184-190.
- [49] 韩昌海, 赵建钧, 王溥文. 黄河沙坡头水利枢纽泥沙淤积特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2002, (4): 13-19.
HAN Chang-hai, ZHAO Jian-jun, WANG Fu-wen. Model Study of Sedimentation Features of the Shapotou Project in the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2002, (4): 13-19. (in Chinese)



(上接 630 页)

- [19] 韩国平, 张井. 碳酸盐岩风化过程中空隙结构的变化[J]. 中国岩溶, 1994, 13(4): 376-382.
HAN Guo-ping, ZHANG Jing. Change of Void Structure in the Course of Weathering of Carbonate Rocks[J]. Carsologica Sinica, 1994, 13(4): 376-382. (in Chinese)
- [20] 李先炜. 岩块力学性质[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
LI Xian-wei. Mechanical Properties of Rock[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1983. (in Chinese)
- [21] 王运兴, 梁收运, 周自强. 白龙江中游地震次生地质灾害特征[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊): 418-423.
WANG Yun-xing, LIANG Shou-yun, ZHOU Zi-qiang. Characteristics of Earthquake Induced Geological Disasters in Middle Reaches of Bailongjiang River[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp.): 418-423. (in Chinese)
- [22] 徐晓华, 陈岐, 陈宏建. 可变种群规模的遗传算法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 870-876.
XU Xiao-hua, CHEN Ling, CHEN Hong-jian. Genetic Algorithm with Variable Population Size[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 870-876. (in Chinese)
- [23] 李铭, 李汤玉. 三种预测油气田产量数学模型比较[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2004, 19(3): 26-29.
LI Ming, LI Tang-yu. Comparison of Three Mathematical Models for Predicting Oil—gas Field Production[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(3): 26-29. (in Chinese)