

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.015

基于一种脆性指标确定岩石残余强度

彭 俊^{1,2}, 荣 冠^{1,2}, 蔡 明³, 彭 坤⁴

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 劳伦森大学 工程学院, 加拿大 萨德伯里 P3E 2C6; 4. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063)

摘 要: 岩石的残余强度是岩石力学的重要指标, 准确地评价岩石残余强度对于评价地下工程的稳定性以及优化岩体支护设计具有重要意义。基于岩石的三轴力学特性提出一种表征岩石峰后强度衰减行为的力学指标——岩石强度衰减系数, 该指标可反映岩石的脆性程度, 并提出岩石强度衰减系数与围压关系的幂函数模型。对 22 组不同成因的岩石常规三轴压缩试验数据进行幂函数模型参数拟合, 发现不同岩石拟合所得参数离散性较大, 分析其原因主要与岩石矿物组成和岩石结构特征等因素相关。在此基础上提出基于强度衰减方法确定岩石残余强度的方法, 分析表明, 该方法能够很好地拟合岩石残余强度试验数据, 并能反映岩石结构性质对残余强度的影响。

关 键 词: 残余强度; 强度衰减; 三轴压缩; 脆性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)02-0403-06

Determination of residual strength of rocks by a brittle index

PENG Jun^{1,2}, RONG Guan^{1,2}, CAI Ming³, PENG Kun⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
3. Bharti School of Engineering, Laurentian University, Sudbury, Ontario P3E 2C6, Canada;
4. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Residual strength of rocks is an important parameter in rock mechanics, because it has a significant influence on accurately evaluating stability of underground excavations and optimizing design of rock mass support. Based on triaxial mechanical properties of the rock, an index, defined as the strength degradation coefficient, is proposed to describe the post-peak strength degradation of rock. In this paper, the index is in essence a brittle index for rocks. A power model is then proposed for the relationship between the strength degradation coefficient and the confinement stress. By fitting the data from 22 lab triaxial compression tests, it is found that the parameters in the model which are different in various rocks can be mainly related to the mineralogical composition and the structure of rocks. Furthermore, a strength degradation method based model is proposed for determining the residual strength of rocks. It is found that the proposed model fits triaxial compression test data of rocks better than the classical Mohr-Coulomb failure criterion does. Meanwhile, it can reflect the influence of structural properties on the residual strength of rocks.

Key words: residual strength; strength degradation; triaxial compression; brittleness

1 引 言

岩石的力学特性是岩石力学的基本问题, 要全面掌握岩石的力学特性就需研究岩石全应力-应变过程的变形以及强度性质。目前, 国内外对于岩石峰前力学特性已有相当多的研究成果, 虽然针对岩石峰后力学特性的研究也逐渐深入^[1-3], 但却鲜有较好的模型或方法确定岩石的残余强度值。确定岩

石残余强度的一般方法为: 通过岩石三轴压缩试验资料拟合岩石的残余强度参数, 再采用 Hoek-Brown 准则或者 Mohr-Coulomb 准则来确定岩石的残余强度^[4]。众所周知, 处于深部或高地应力区的岩体强度和稳定性与岩体峰后力学性质密切相关。因此, 研究岩石的峰后力学特性以及残余强度的确定方法对于岩体工程设计具有重要意义。

众多岩石常规三轴压缩试验规律揭示, 岩石的

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家 973 项目(No. 2011CB013501, No. 2010CB732005); 国家自然科学基金资助(No. 50979081); 新世纪优秀人才计划(No. NCET-11-0406); 中央高校基本科研业务费专项项目(No. 2012206020215)。

第一作者简介: 彭俊, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩体力学特性及水力耦合特性研究。E-mail: pengjun2010@gmail.com

通讯作者: 荣冠, 男, 1971 年生, 教授, 主要从事岩体力学耦合和边坡稳定性研究。E-mail: rg_mail@163.com

力学特性与所施加的围压密切相关。岩石在低围压条件下表现出明显的脆性特点,即岩石应力-应变曲线达到峰值强度后迅速跌落至残余强度。随着所施加的围压逐渐增大,岩石逐渐表现出一定的延性特点。即岩石应力-应变曲线达到峰值强度后并不会快速跌落,而是缓慢下降至残余强度并趋于稳定。围压增大到一定水平,岩石应力-应变曲线的峰后阶段基本展现出理想塑性的力学响应^[5-7]。根据岩石脆延塑性转换的力学特点可以看出,随着围压逐渐增大,岩石的峰值强度及残余强度均逐渐增大,而峰值强度与残余强度的差值也逐渐降低,即强度衰减逐渐降低。基于上述规律,定义一种可以表征岩石峰后强度衰减行为的力学指标,并提出该指标与围压的关系模型。然后,通过大量岩石三轴压缩试验资料拟合该模型的参数,最后,在此基础上提出基于强度衰减指标确定岩石残余强度的方法。

2 岩石脆性指标定义

2.1 强度衰减系数定义

岩石力学特性与所施加的围压密切相关,图 1 为不同围压条件下岩石应力-应变响应示意图,由图可以看出,(1)随着围压逐渐增大,岩石峰值强度与残余强度均逐渐增大;(2)岩石强度衰减(峰值强度与残余强度的差值)逐渐减小;(3)当围压高到一定水平,岩石峰后应力-应变响应表现为理想塑性的特点,即此时岩石强度衰减为 0。

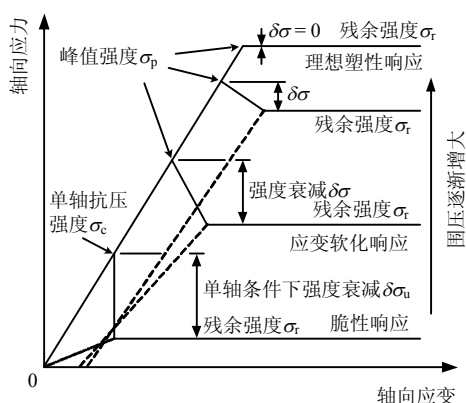


图 1 不同围压条件下岩石简化应力-应变响应
Fig.1 Simplified stress-strain relations of rock under different confining stresses

基于上述规律,定义岩石强度衰减系数 D_s 以表征岩石峰后强度衰减行为

$$D_s = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p} = \frac{\delta\sigma}{\sigma_p} \quad (1)$$

式中: σ_p 为某一围压条件下岩石的峰值强度; σ_r 为

对应的残余强度; $\delta\sigma$ 为该围压条件下岩石强度衰减。特殊的,称岩石在单轴压缩条件下的强度衰减系数为初始强度衰减系数并记做 D_{s0} ,可表示为

$$D_{s0} = \frac{\delta\sigma_u}{\sigma_c} \quad (2)$$

式中: $\delta\sigma_u$ 为单轴条件下岩石强度衰减; σ_c 为岩石单轴抗压强度。

根据定义,单轴压缩条件下岩石残余强度较小,强度衰减 $\delta\sigma_u$ 较大,此时岩石初始强度衰减系数 D_{s0} 接近 1。随围压逐渐增大,岩石强度衰减 $\delta\sigma$ 逐渐减小,而峰值强度 σ_p 逐渐增大,于是岩石强度衰减系数 D_s 逐渐减小。当围压增大至某一水平,岩石表现为理想塑性响应,岩石强度衰减 $\delta\sigma = 0$,此时岩石强度衰减系数 $D_s = 0$ 。综上分析,岩石强度衰减系数 D_s 与围压表现出明显的负相关关系,且其为介于 0~1 之间的无量纲参数。

岩石强度衰减系数在一定程度上能反映岩石的脆性特征。在相同围压条件下,岩石强度衰减系数越大,表明岩石峰值强度到残余强度的跌落越大,即岩石的脆性越强;反之,岩石强度衰减系数越小,岩石的脆性越低。因此,岩石强度衰减系数本质上是一个脆性指标。

2.2 衰减系数与围压的关系

为得到岩石强度衰减系数与围压的关系,选取典型岩石常规三轴压缩试验数据^[5-6,8],并按式(1)、(2)计算其不同围压条件下的强度衰减系数,如表 1 所示。图 2 为不同岩石强度衰减系数随围压的变化关系,由图可见,强度衰减系数与围压表现出明显的负相关性。根据上节分析,围压为 0 时,初始强度衰减系数为接近 1;当围压大到一定程度时,岩石会表现出理想塑性响应,强度衰减系数趋近于 0。为反映上述特征,采用幂函数模型以表征岩石强度衰减系数 D_s 与围压的关系,具体表示为

$$D_s = D_{s0} \left(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_3^{dc}} \right)^n \quad (3)$$

式中: σ_3^{dc} 为岩石表现为理想塑性时对应的围压上限值,对应于岩石强度衰减系数和围压关系拟合曲线与横坐标的交点; σ_3 为最小主应力;参数 n 为一无量纲参数。它们均可以通过岩石常规三轴压缩试验资料拟合求得。

3 模型参数拟合

为分析不同岩石幂函数模型参数的规律性,选

表 1 不同岩石强度衰减系数计算结果
Table 1 Estimation of strength degradation coefficients for different rocks

岩石类型	围压 / MPa	峰值强度 / MPa	残余强度 / MPa	强度衰减系数
Vosges 砂岩 ^[5]	0.5	33.5	0.5	0.985
	10.0	83.0	49.0	0.410
	20.0	114.0	94.0	0.175
	30.0	134.0	116.0	0.134
	40.0	149.0	135.0	0.094
	50.0	167.0	154.0	0.078
	60.0	174.0	165.0	0.052
Tennessee 大理岩 ^[6]	0.0	130.0	10.0	0.923
	3.5	145.0	60.0	0.586
	6.9	160.0	80.0	0.500
	13.8	180.0	110.0	0.389
	20.7	195.0	130.0	0.333
	27.6	215.0	180.0	0.163
	34.5	245.0	230.0	0.061
Biotite 绿泥石 片岩 ^[7]	48.3	275.0	270.0	0.018
	0.0	59.8	3.0	0.950
	7.0	97.0	24.4	0.749
	10.0	105.8	39.2	0.630
	20.0	131.9	85.4	0.353
	30.0	149.9	125.9	0.160
	40.0	176.4	174.6	0.011

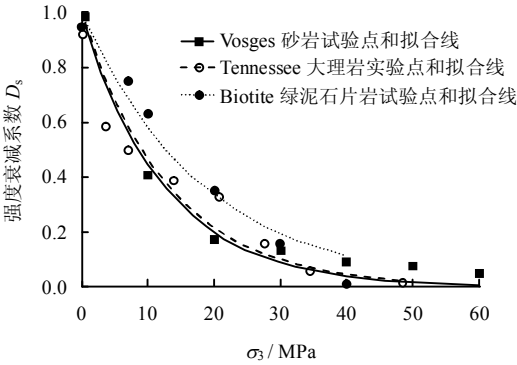


图 2 不同岩石强度衰减系数与围压关系
Fig.2 Variation of strength degradation coefficient with confinement for different rocks

用 22 种岩石常规三轴压缩试验资料,采用 Origin8.5 软件的非线性方法拟合不同岩石的模型参数。所选岩石三轴压缩试验资料包括 4 组砂岩^[5, 9-11]、5 组大理岩^[6-8, 12]、3 组花岗岩^[13-15]、4 组片麻岩^[8]、2 组石英岩^[8]、1 组绿泥石片岩^[8]、1 组安山岩^[15]、1 组泥岩^[16]以及 1 组煤岩^[17]。不同岩石拟合结果见表 2, 岩石单轴抗压强度以及初始强度衰减系数 D_{s0} 通过岩石三轴压缩试验资料直接获得, 模型参数 σ_3^{dc} 以及 n 通过拟合得到。

表 2 不同岩石模型参数拟合结果
Table 2 Fitting results with different rock models

岩性	岩样	单轴抗压强度 / MPa	初始强度衰减系数 D_{s0}	围压上限值 σ_3^{dc} / MPa	参数 n	R^2
砂岩	Vosges 砂岩	33.5	0.985	117.1	8.644	0.972
	一种中颗粒砂岩	40.5	0.845	83.3	4.805	0.902
	文献[10]砂岩	67.5	1.000	146.4	5.380	0.878
	文献[11]砂岩	71.7	0.847	94.8	4.748	0.956
大理岩	Tennessee 大理岩	130.0	0.923	70.3	4.119	0.917
	锦屏大理岩	143.0	0.706	62.4	1.951	0.982
	一种中颗粒大理岩	147.7	0.991	107.4	6.406	0.901
	一种粗颗粒大理岩	63.7	0.884	25.0	5.858	0.998
	Rajnagar 大理岩	89.8	0.944	46.1	1.157	1.000
花岗岩	Lac du Bonnet 花岗岩	232.8	0.985	229.7	4.625	0.761
	三峡花岗岩	176.4	0.845	246.9	5.202	0.843
	Inada 花岗岩	197.1	1.000	179.1	5.286	0.710
片麻岩	Biotite 片麻岩	34.9	0.985	33.2	1.881	0.971
	Augen 片麻岩	53.2	0.845	43.1	1.609	0.999
	Purulia 片麻岩	158.9	1.000	99.6	2.037	0.991
	Kirthai 片麻岩	139.1	0.847	167.5	4.821	0.916
石英岩	Uttarkashi 石英岩	96.7	0.948	168.5	5.716	0.986
	Parbati 石英岩	75.7	0.982	235.6	4.594	0.925
绿泥石片岩	Biotite 绿泥石片岩	59.8	0.950	39.9	1.363	0.998
安山岩	Sanjome 安山岩	103.4	0.964	125.3	6.180	0.923
泥岩	辛置泥岩	21.2	0.580	46.0	1.571	0.902
煤岩	鲍店煤岩	30.2	0.897	118.8	7.250	0.994

根据拟合结果, 模型参数 σ_3^{dc} 基本与岩石单轴抗压强度呈现良好正相关关系, 即岩石单轴抗压强度越大, 拟合参数 σ_3^{dc} 表现出越大的趋势。不同岩石模型参数 σ_3^{dc} 和 n 差异性较大, 即使岩性相同, σ_3^{dc} 和 n 也存在差异, 其原因主要是与岩石的矿物组成和岩石结构特征等因素有关。比如, 中颗粒大理岩 σ_3^{dc} 和 n 较粗颗粒大理岩大, 表明颗粒粒径对拟合参数的大小有一定影响。另外, Purulia 片麻岩和 Kirthai 片麻岩拟合参数比 Biotite 片麻岩和 Augen 片麻岩大, 主要与岩石的矿物组成有关。Purulia 片麻岩和 Kirthai 片麻岩为花岗片麻岩, 岩石中含有较多石英、长石等矿物。拟合所得 σ_3^{dc} 和 n 可反映岩石的强度特性。

不同岩石各强度指标及拟合参数大小如图 3 所示, 图中各指标及拟合参数均通过相同岩石加权平均求得。初始强度衰减系数在图中放大 100 倍, 拟合参数 n 放大 10 倍以方便对比。从图中可以看出, 除泥岩外, 其他岩石的初始强度衰减系数均较大, 表明岩石在单轴压缩条件下的脆性均较高, 泥岩的初始强度衰减系数较小, 这主要与泥岩的力学特性密切相关。泥岩是一种软岩, 强度较低, 且延性较强, 脆性较弱, 使得脆性-延性转换应力较低, 表 2 中泥岩的拟合围压上限值较低, 与此一致。

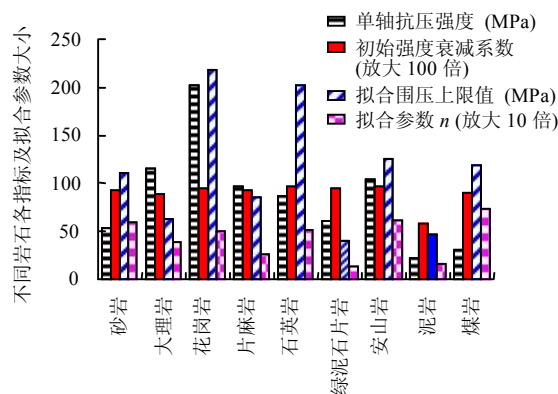


图 3 不同岩石各指标及拟合参数汇总
Fig.3 Summary of fitting parameters and strength indexes for different rocks

4 岩石残余强度计算方法

目前, 一般通过广泛应用的岩石峰值强度模型如 Mohr-Coulomb 强度准则或 Hoek-Brown 强度准则来确定岩石的残余强度, 采用 Mohr-Coulomb 强度准则确定岩石残余强度的计算公式为

$$\sigma_r = \frac{2c_r \cos \phi_r}{1 - \sin \phi_r} + \frac{1 + \sin \phi_r}{1 - \sin \phi_r} \sigma_3 \quad (4)$$

式中: c_r 和 ϕ_r 分别为岩石或者岩体的残余凝聚力以及残余摩擦角。它们均可通过岩石常规三轴压缩试验数据拟合得到, 然而由于室内试验往往高估岩石的残余强度, 该方法难以被推广应用。

采用 Hoek-Brown 强度准则确定岩石残余强度的计算公式为^[18]

$$\sigma_r = \sigma_3 + \sigma_{ci}^R \left(m_b^R \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}^R} + s \right)^a \quad (5)$$

式中: σ_{ci}^R 和 m_b^R 为岩石残余强度参数。它们可通过完整岩石的单轴抗压强度 σ_{ci} 以及材料参数 m_b 折减得到, s 和 a 为 Hoek-Brown 强度参数。由于岩石的单轴抗压强度表征岩石自身的力学特性, Crowder 等^[19]指出, 对岩石单轴抗压强度进行折减的方法会使得该参数物理意义不明确。

随后众多学者通过构建残余地质强度指标 GSI_r 的方法建立确定岩体的残余强度^[4, 20-22], 该方法能够准确地确定节理岩体的残余强度, 然而却不能用于完整岩石残余强度的确定。根据岩石强度衰减系数的定义, 笔者提出如下岩石残余强度计算公式为

$$\sigma_r = (1 - D_s) \sigma_p \quad (6)$$

这里 $1 - D_s$ 称为衰减因子, 表征岩石从峰值强度到残余强度的跌落程度, 如果该衰减因子已知, 便可根据式 (6) 通过岩石的峰值强度确定其残余强度值, 这在理论与实际应用中均是可以实现的。首先, 岩石的峰值强度模型已相当完善, 通过已有模型能很好地预测岩石的峰值强度; 其次, 室内试验较易得到岩石的峰值强度指标。而岩石峰后应力-应变曲线需经历大约 5~10 倍的峰值应变过程才能趋于稳定^[4], 大多岩石常规三轴压缩试验往往在未达到岩石残余强度时已停止加载, 因此, 往往高估岩石的残余强度, 采用上述模型能较准确地基于岩石峰值强度确定其残余强度。将上面提出的岩石强度衰减系数与围压关系的幂函数模型代入式 (6) 可以得到

$$\sigma_r = \left(1 - D_{s0} \left(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_3^{dc}} \right)^n \right) \sigma_p \quad (7)$$

式中: n 为模型拟合参数。根据上面的讨论, 上述参数均可表征岩石的力学性质, 不同岩石的模型参数取值均有差异, 主要与岩石内部矿物组成以及岩石结构特征等有关。

为验证本文提出岩石残余强度算法的合理性, 采用该模型拟合 Vosges 砂岩以及 Tennessee 大理岩

三轴压缩试验数据, 并与 Mohr-Coulomb 强度准则拟合结果进行对比。图 4 为不同模型拟合岩石残余强度的结果, 采用 Mohr-Coulomb 强度准则拟合得到 Vosges 砂岩的残余凝聚力为 6.63 MPa, 残余摩擦角为 27.07° , Tennessee 大理岩的残余凝聚力为 7.19 MPa, 残余摩擦角为 42.64° 。采用本文模型拟合 Vosges 砂岩以及 Tennessee 大理岩残余强度试验数据需先得到岩石的峰值强度, 峰值强度采用 Hoek-Brown 强度准则确定。由图可知, 由于本文提出模型采用三参数拟合, 且为非线性形式, 因此, 采用本文方法拟合两种岩石残余强度试验数据较 Mohr-Coulomb 强度准则效果好, 表明本文提出的方法能够较好地确定岩石的残余强度值。

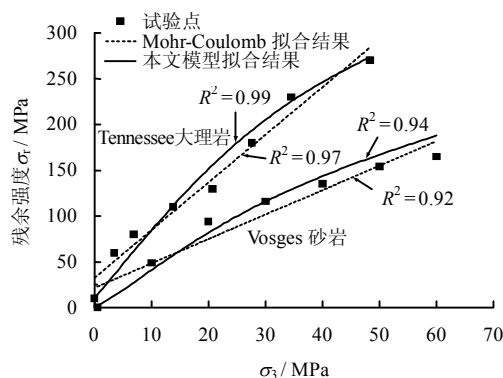


图 4 Tennessee 大理岩以及 Vosges 砂岩三轴压缩试验数据拟合结果

Fig.4 Fitting results of triaxial compression test data from Tennessee marble and Vosges sandstone

岩石强度从峰值到残余的跌落程度主要取决于两个因素。首先, 岩石强度跌落与所施加的围压水平密切相关。不同围压条件岩石的强度跌落程度不同, 围压越小, 强度跌落越大, 反之亦然。其次, 岩石的物质组成、结构特征及形成过程对岩石强度跌落程度也有重要影响, 不同岩石由于其岩石学成因和结构存在差异, 表现不同的力学性质并导致强度跌落程度的差异。本文提出的岩石残余强度算法能较好地体现上述两个因素对岩石强度跌落的影响, 然而, 不同类别岩石的模型参数变化规律以及取值范围还有待进一步研究。

5 结 论

(1) 定义了一种表征岩石峰后强度衰减行为的力学指标——岩石强度衰减系数, 该系数是一种脆性指标, 并提出了该系数与围压关系的幂函数模型。

(2) 基于 22 组岩石三轴压缩试验数据进行了模型参数拟合, 分析发现, 模型参数与岩石的细观

特性如矿物组成以及岩石结构等密切相关, 能够反映岩石自身的力学特性。

(3) 提出了基于岩石强度衰减方法确定岩石残余强度的算法。对比分析表明, 本文提出的模型能较好地拟合岩石三轴压缩试验数据。

参 考 文 献

- [1] POUYA A, GHOREYCHI M. Determination of rock mass strength properties by homogenization[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(13): 1285—1303.
- [2] STEINER W. Swelling rock in tunnels: Rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(4): 361—380.
- [3] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 脆塑性岩体的分析原理及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(1): 8—21.
ZHENG Hong, GE Xiu-run, LEE C F. Analysis principle for rock mass with brittle plasticity and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(1): 8—21.
- [4] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 247—265.
- [5] BEÂSUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S. Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37: 1223—1237.
- [6] WAWERSIK W R, FAIRHURST C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1970, 7(5): 561—575.
- [7] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 1999—2009.
ZHANG Chun-sheng, CHEN Xiang-rong, HOU Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of*

- Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 1999—2009.
- [8] KUMAR R, SHARM K G, VARADARAJAN A. Post-peak response of some metamorphic rocks of India under high confining pressures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47: 1357—1362.
- [9] ZHAO X G, CAI M. A mobilized dilation angle model for rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47: 368—384.
- [10] BIENIAWSKI Z T. Deformational behaviour of fractured rock under multiaxial compression[C]//Proceedings of Southampton Civil Engineering Materials Conference. London: Wiley-Interscience, 1971: 589—598.
- [11] LIUE L, HE S M, XUE X H, et al. Dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2011, 44: 629—634.
- [12] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(3): 475—478.
- YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental investigation on strength and deformation properties of marble under conventional triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 475—478.
- [13] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Canada: University of Manitoba. 1993.
- [14] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(增刊 1): 2651—2655.
- ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Study on post-peak mechanical behavior and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2651—2655.
- [15] HE C R, OKUBO S, NISHIMATSU Y. Loading rate dependency of class II rock under confining pressure[J]. **Journal of the Society of Materials Science**, 1989, 38: 216—220.
- [16] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(3): 640—648.
- LU Yin-long, WANG Lian-guo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 640—648.
- [17] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. **煤炭学报**, 2006, 31(2): 150—153.
- YANG Yong-jie, SONG Yang, CHEN Shao-jie. Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(2): 150—153.
- [18] CUNDALL P, CARRANZA-TORRES C, HART R. A new constitutive model based on the Hoek-Brown criterion[C]//Proceedings of the 3rd International FLAC Symposium. Sudbury. Canada: Balkema Press, 2003: 17—25.
- [19] CROWDER J J, BAWDEN W F. Review of post-peak parameters and behaviour of rock masses: current trends and research[J]. **RocNews**, 2004, Fall: 1—14.
- [20] RUSSO G, KALAMARAS G S, GRASSO P. A discussion on the concepts of geomechanical classes behavior categories and technical classes for an underground project[J]. **Gallerie Grandi Opere Sotteranee**, 1998, 10(6): 49—54.
- [21] RIBACCHI R. Mechanical tests on pervasively jointed rock material: Insight into rockmass behaviour[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2000, 33(4): 243—266.
- [22] 王宇, 李晓, 李守定, 等. 一种确定节理岩体残余强度参数方法的探讨[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(8): 1701—1713.
- WANG Yu, LI Xiao, LI Shou-ding, et al. A method for determining residual strength parameters of jointed rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1701—1713.