

文章编号: 1674—8247(2022)06—0092—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2022.06.017

## 郑万铁路巴东组泥岩力学试验研究

王国军<sup>1</sup> 朱小兵<sup>1</sup> 刘保林<sup>1</sup> 赵东平<sup>2,3</sup> 季启航<sup>3</sup>

(1. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;

3. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**为得到隧道围岩体的物理力学参数,本文开展了烘干状态与饱水状态下巴东组泥岩的单轴、三轴压缩试验,结果表明:(1)在单轴试验条件下,烘干状态巴东组泥岩单轴抗压强度为 39.74 MPa,弹性模量为 8.84 GPa,饱水状态单轴抗压强度为 29.41 MPa,弹性模量为 7.23 GPa;(2)在三轴试验条件下,烘干状态巴东组泥岩的内摩擦角为 53.91°,粘聚力为 7.35 MPa,饱水状态内摩擦角为 48.85°,粘聚力为 6.61 MPa;(3)随着围压的增大,巴东组泥岩的弹性模量逐渐增大,水对巴东组泥岩弹性模量的削弱作用更为显著。根据现场掌子面揭示情况,利用 RocLab 程序将试验所得的岩样参数转化为了现场岩体的参数。

**关键词:**岩石力学;力学试验;巴东组泥岩;水作用;岩体参数

中图分类号: TU451+2 文献标识码: A

## Study on Mechanical Tests of Mudstone of Badong Formation for Zhengzhou-Wanzhou Railway

WANG Guojun<sup>1</sup> ZHU Xiaobing<sup>1</sup> LIU Baolin<sup>1</sup> ZHAO Dongping<sup>2,3</sup> JI Qihang<sup>3</sup>

(1. CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co., Ltd., Chongqing 400023, China;

2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to obtain the physical and mechanical parameters of the surrounding rock mass in the tunnel, we carried out the uniaxial and triaxial compression tests of mudstone of Badong Formation in the oven-dried state and water saturated state. The results show that: (1) Under the uniaxial test conditions, the uniaxial compressive strength and elastic modulus of mudstone of Badong Formation are 39.74 MPa and 8.84 GPa respectively in the oven-dried state, and 29.41 MPa and 7.23 GPa respectively in the water saturated state. (2) Under the triaxial test conditions, the internal friction angle and cohesion of mudstone of Badong Formation are 53.91° and 7.35 MPa respectively in the oven-dried state, and 48.85° and 6.61 MPa respectively in the water saturated state. (3) With the increase of confining pressure, the elastic modulus of mudstone of Badong Formation gradually increases, and the weakening effect of water on the elastic modulus of mudstone of Badong Formation is more obvious. According to the conditions revealed by the tunnel face on site, we use RocLab program to convert the parameters of the rock samples obtained from these tests into the parameters of the on-site rock mass.

收稿日期: 2021-07-20

作者简介: 王国军(1982-),男,高级工程师。

引文格式: 王国军,朱小兵,刘保林,等. 郑万铁路巴东组泥岩力学试验研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 92-96.

WANG Guojun, ZHU Xiaobing, LIU Baolin, et al. Study on Mechanical Tests of Mudstone of Badong Formation for Zhengzhou-Wanzhou Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 92-96.

**Key words:** rock mechanics; mechanical test; mudstone of Badong Formation; action of water; parameters of rock mass

郑万高速铁路小三峡隧道全长 18.9 km,隧道洞身段穿越三叠系中统巴东组一、二段( $T_2b^{1+2}$ )、下统嘉陵江组( $T_{2j}$ )、及大冶组( $T_1d$ )等地层,其中三叠系中统巴东组一、二段是以紫红色泥岩为主的地层。泥岩具有强度低、遇水软化明显、膨胀等特点<sup>[1]</sup>,属于软岩类。地勘资料显示,泥岩呈块碎状镶嵌结构及层状结构,围岩稳定性差;岩溶一般较发育,容易产生大量坍塌和涌水,将对隧道的施工造成较大的影响。因此,对巴东组泥岩的力学特征进行研究,可为依托于该隧道工程的理论计算分析工作提供基础。

泥岩物理力学参数方面,殷跃平<sup>[2-4]</sup>等对三峡库区内巴东组泥岩的膨胀性、崩解性、干湿循环强度弱化特性等力学特性进行了研究;张家铭<sup>[5]</sup>等通过三轴试验得到了巴东组泥岩的全应力-应变曲线,并将其划分为 4 个阶段,提出了每一段的本构方程;王闰超<sup>[6]</sup>等建立了巴东组泥岩的流变本构模型,准确描述了岩石的 3 个典型流变阶段。

目前,针对巴东组泥岩的自身特性已有部分研究,但其试验所得参数与现场实际岩体的参数存在较大区别,而且对于如何将试验得到的岩样参数转化为现场岩体参数尚未提及。本文通过单轴和三轴压缩试验对巴东组泥岩物理力学参数进行了测试,并基于 Hoek-Brown 准则将试验参数转化为了现场岩体参数。研究成果可为后期研究的理论及数值分析提供依据,也可为其他工程提供参考。

### 1 试验方案

巴东组泥岩岩样采自郑万高速铁路小三峡隧道的多个区段,按规范要求加工为直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱体试件。利用 MTS-815 型程控伺服刚性试验机对巴东组泥岩的物理力学参数进行测试。该试验机用于岩石及混凝土的试验,可以在常温、高温条件下进行岩石及混凝土材料单轴、三轴压缩试验,在多种控制模式之间可随意切换,是现在国内较为先进的室内岩石力学试验设备。

试验共制 144 个巴东组泥岩岩样,试验测得的巴东组泥岩岩样最大密度为  $2.77\text{ g/cm}^3$ ,最小密度为  $2.61\text{ g/cm}^3$ ,平均密度为  $2.70\text{ g/cm}^3$ 。依据完整度和密度对岩样进行分组,分别对烘干和饱水状态下试验岩样进行单轴压缩试验与三轴压缩试验,得到烘干和饱水状态下巴东组泥岩的弹性模量、内摩擦角、粘聚力以及泊松比。试验分组如表 1 所示。

表 1 巴东组泥岩力学试验分组表

试验类型	岩样状态	试验组数/组
单轴试验	烘干状态	6
	饱水状态	6
三轴试验	烘干状态	6
	饱水状态	6

## 2 试验结果分析

### 2.1 巴东组泥岩单轴压缩试验

常规单轴压缩试验包括烘干状态和饱水状态各 6 组,根据试验过程中 MTS 试验机的控制计算机自动采集的原始数据计算轴向应力、轴向应变和环向应变,并由式(1)计算得到巴东组泥岩的弹性模量。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_d}$$

(1)

式中: $E$ ——弹性模量(MPa);  
 $\sigma$ ——轴向应力(MPa);  
 $\varepsilon_d$ ——轴向应变。

巴东组泥岩单轴应力-应变曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,单轴压缩试验过程中巴东组泥岩在烘干与饱水状态下应力-应变曲线形态基本一致,峰值前可分为 3 个阶段:裂隙压密阶段、弹性阶段以及塑性变形阶段。在裂隙压密阶段,由于岩样内部存在微小裂隙或节理面,岩样内部受压闭合,应力应变曲线有向上弯曲的趋势;在弹性阶段,岩样的裂隙受压密实后,应力应变曲线近似于直线,表明该阶段泥岩的性质较为稳定;在塑性变形阶段,由于岩样承受较大的外部荷载,内部裂隙起裂扩展,并最终在荷载作用下裂隙贯通导致岩样发生破坏。

巴东组泥岩在烘干与饱水状态下的单轴抗压强度、弹性模量以及泊松比如表 2 所示。相较于烘干状态,饱水状态下巴东组泥岩的单轴抗压强度与弹性模量有所降低,泊松比有所增大,即饱水条件下巴东组泥岩的变形更为显著。

表 2 巴东组泥岩参数均值统计表

岩样参数	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
烘干状态	39.74	8.84	0.22
饱水状态	29.41	7.23	0.24
降幅/%	25.99	18.21	-9.09

### 2.2 巴东组泥岩三轴压缩试验

常规三轴压缩试验包括烘干转台和饱水状态各 6 组,每组 5 个试样分别按 2 MPa、4 MPa、6 MPa、

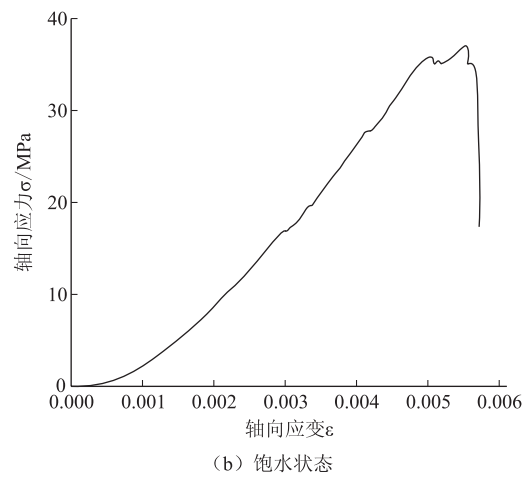
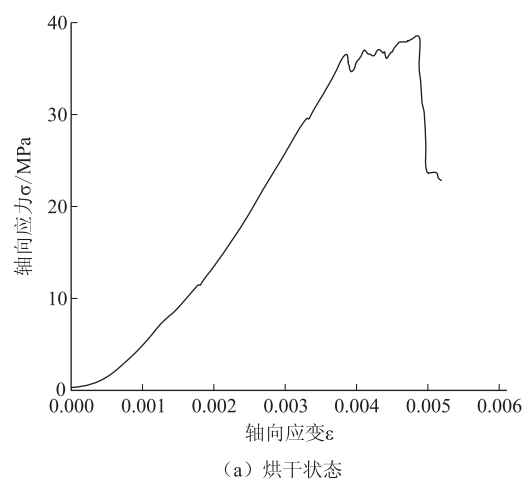


图 1 巴东组泥岩单轴应力 - 应变曲线图

8 MPa 及 10 MPa 围压进行试验。围压以 0.05 MPa/s 加载速率至预定侧压力,轴向加载方式以 0.1 mm/min 的速度进行加载,得到不同围压下的破坏强度,并利用式(2)、式(3)求出每组的峰值内摩擦角( $\varphi$ )和粘聚力( $c$ )。

$$c = \frac{\sigma_c(1 - \sin\varphi)}{2\cos\varphi}$$

(2)

$$\varphi = \arcsin \frac{m - 1}{m + 1}$$

(3)

式中:  $\sigma_c$ ——轴向应力 - 围压关系曲线纵坐标的应力截距 (MPa);  
 $m$ ——轴向应力 - 围压关系曲线的斜率;  
 $\varphi$ ——内摩擦角( $^{\circ}$ );  
 $c$ ——粘聚力(MPa);

烘干状态巴东组泥岩(第一组)主应力差 - 轴向应变关系曲线如图 2 所示。随着围压的增大,主应力差 - 应变曲线的斜率明显增大,破坏状态下的主应力差与轴向应变明显提高,巴东组泥岩的强度随着侧压

力的增大而有所提高。

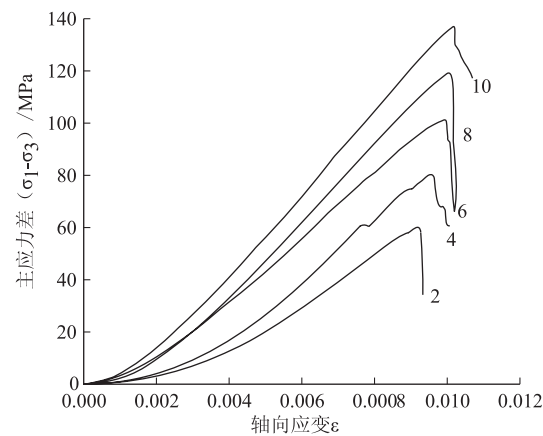


图 2 烘干状态巴东组泥岩(第一组)主应力差 - 轴向应变关系曲线图

烘干状态与饱水状态下巴东组泥岩弹性模量如表 3 和图 3 所示。随着围压的增大,巴东组泥岩的弹性模量逐渐增大;烘干状态下巴东组泥岩弹性模量的增长速率明显大于饱水状态,相对于烘干状态,饱水状态下巴东组泥岩弹性模量的减幅由 10.33% (围压 2 MPa) 增长到 19.91% (围压 10 MPa),即围压较大时水对巴东组泥岩弹性模量的削弱作用更为显著。巴东组泥岩内摩擦角、粘聚力、泊松比如表 4 所示。由表 4 可知,相较于烘干状态,饱水状态下巴东组泥岩内摩擦角降低 9.39%,粘聚力降低 10.07%,泊松比提高 9.09%。

表 3 巴东组泥岩弹性模量统计表(GPa)

围压/MPa	2	4	6	8	10
烘干状态	10.46	11.42	13.01	14.67	16.02
饱水状态	9.38	10.22	11.34	12.07	12.83
降幅/%	10.33	10.51	12.84	17.72	19.91

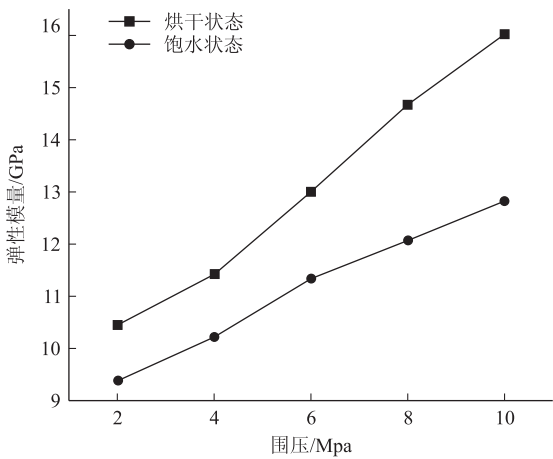


图 3 巴东组泥岩弹性模量与围压的变化关系曲线图

表 4 巴东组泥岩内摩擦角、粘聚力、泊松比统计表			
岩样参数	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 $c/\text{MPa}$	泊松比
烘干状态	53.91	7.35	0.22
饱水状态	48.85	6.61	0.24
降幅/%	9.39	10.07	-9.09

3 现场岩体参数转化

试验所用的岩样取自完整岩块, 根据 TB 1003 – 2016《铁路隧道设计规范》<sup>[7]</sup>可将上述试验的巴东组泥岩划分为Ⅱ级围岩, 而小三峡隧道现场岩体较为破碎, 围岩等级仅为Ⅳ级, 现场岩体的力学参数与试件测试所得参数相差较大。

针对上述情况, 将试验所得参数转化为现场岩体参数, 以便后续的研究。Hoek-Brown 准则可基于地质强度指标(GSI)评价岩体的强度, 并估算岩体破碎状态下的弹性模量、粘聚力以及内摩擦角, 其表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \tag{4}$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ ——分别为最大、最小主应力(MPa);  
 $\sigma_c$ ——完整岩体的单轴抗压强度(MPa);  
 $m_b$ 、 $a$ ——岩石经验参数(量纲为 1);  
 $s$ ——反映岩体的破碎程度。  
 $m_b$ 、 $a$ 、 $s$  可通过式(5)~式(7)计算得出。

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \tag{5}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \tag{6}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( \exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right) \tag{7}$$

式中:  $m_i$ ——岩石经验参数(量纲为 1), 反映岩石的软硬程度;

$GSI$ ——地质强度指标;  
 $D$ ——岩石的扰动系数。

基于 Hoek-Brown 破坏准则, Rocscience 开发的 RocLab 程序可以利用完整岩样的单轴抗压强度与弹性模量、地质强度指标(GSI)、岩体参数  $m_i$  以及岩体扰动系数  $D$  计算出现场破碎岩体的弹性模量、内摩擦角与粘聚力。

地质强度指标可根据现场岩体结构以及结构面表面进行判断。由现场掌子面揭示情况可知, 掌子面表面岩体包含许多不连续集形成的角状块体褶皱与断层, 结构面中度风化且较为平整。根据 GSI 分级表<sup>[8]</sup>可大致估算现场岩体的 GSI 值为 40, 泥岩的  $m_i$  值可根据参考值取 7, 由于现场采用机械开挖, 对围岩

的扰动较小, 岩体干扰系数可取 0。利用巴东组泥岩单轴试验测得的单轴抗压强度平均值 39.74 MPa, 弹性模量平均值 8.84 GPa, 以及现场隧道埋深情况、岩体重度, 利用 RocLab 程序得出现场岩体的相关系数如图 4 所示。

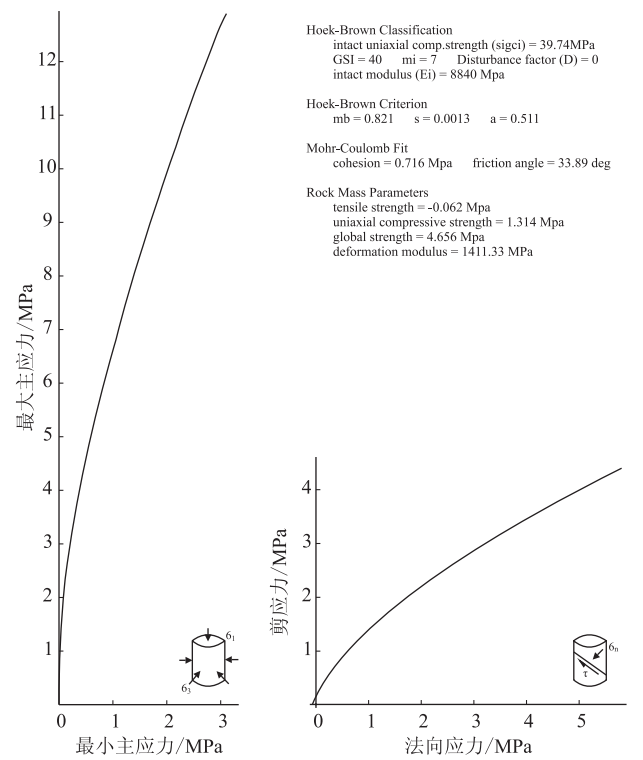


图 4 RocLab 程序计算结果图

根据 RocLab 程序的计算结果可以看出: 小三峡隧道现场巴东组泥岩岩体的弹性模量为 1.41 GPa, 内摩擦角为 33.89°, 粘聚力为 0.716 MPa。根据《铁路隧道设计规范》对各级围岩的物理力学指标的参考值, Ⅳ级围岩的弹性模量为 1.3~6 GPa, 内摩擦角为 27°~39°, 粘聚力为 0.2~0.7 MPa, 换算得到的小三峡隧道巴东组泥岩的物理力学参数, 可将现场围岩等级划分为Ⅳ级, 该结果与地质勘测结果一致。

4 结论

本文基于单轴、三轴压缩试验对巴东组泥岩的物理力学参数进行测试, 并利用 Hoek-Brown 准则转化为现场岩体参数, 为后续研究奠定了基础, 得出的主要结论如下:

(1) 巴东组泥岩的破坏可大致分为 3 个阶段: 裂隙压密阶段、弹性阶段、塑性变形阶段。在塑性变形阶段, 随着岩样内部裂隙的起裂扩展, 最终在荷载作用下裂隙贯通引起岩样破坏。



(2)在饱水状态下,巴东组泥岩的弹性模量、内摩擦角以及粘聚力有所减小,泊松比有所增大。

(3)随着围压的增大,巴东组泥岩的弹性模量逐渐增大,破坏状态下的主应力差与轴向应变明显提高,强度有所增大;在围压较大时,水对巴东组泥岩弹性模量的削弱作用更为显著。

(4)基于 Hoek-Brown 准则,利用 RocLab 程序,根据完整岩样单轴抗压强度、弹性模量、地质强度指标(GSI)、岩体参数  $m_i$  以及岩体扰动系数  $D$ ,得到现场岩体的弹性模量、内摩擦角以及粘聚力,与Ⅳ级围岩物理力学参数参考值基本对应。

参考文献:

[1] 司文明. 川南城际高速铁路路基变形监测设计探讨[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 41-45.  
SI Wenming. A Study on Design of Subgrade Deformation Monitoring for South Sichuan Intercity High-Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 41-45.

[2] 殷跃平,胡瑞林. 三峡库区巴东组(T2b)紫红色泥岩工程地质特征研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 124-135.  
YIN Yueping, HU Ruilin. Engineering Geological Characteristics of Purplish-Red Mudstone of Middle Tertiary Formation at the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 124-135.

[3] 吴益平,余宏明,胡艳新. 巴东新城区紫红色泥岩工程地质性质研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1201-1203.  
WU Yiping, YU Hongming, HU Yanxin. Research on Engineering

Geological Characters of Aubergine Mudstone of Badong New City Zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1201-1203.

[4] 苗亮,韩松,申培武,等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环强度弱化特性的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(6): 85-93.  
MIAO Liang, HAN Song, SHEN Peiwu, et al. Experimental Study on Strength Weakening of Purple-Red Mudstone in Badong Formation Based on Cyclic Wetting and Drying Test [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(6): 85-93.

[5] 张家铭,刘宇航,罗昌宏,等. 巴东组紫红色泥岩三轴压缩试验及本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 138-142.  
ZHANG Jiaming, LIU Yuhang, LUO Changhong, et al. Triaxial Compression Test and Constitutive Model for Red Mudstone of Badong Formation [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 138-142.

[6] 王闫超,晏鄂川,丛璐,等. 巴东组泥岩非线性流变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3362-3373.  
WANG Yanchao, YAN Echuan, CONG Lu, et al. Study on Creep Constitutive Model of Badong Formation Mudstone under Triaxial Creep Test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3362-3373.

[7] TB 1003-2016 铁路隧道设计规范[S].  
TB 1003-2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].

[8] 朱合华,张琦,章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945-1963.  
ZHU Hehua, ZHANG Qi, ZHANG Lianyang. Review of Research Progresses and Applications of hoek-Brown Strength Criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1945-1963.