

# 富水全、强风化砂岩强度特性 试验及本构关系探讨

邹 翀<sup>1</sup>, 雷胜友<sup>2</sup>, 岳喜军<sup>2</sup>, 宋 妍<sup>1</sup>, 高 攀<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道集团有限公司技术中心, 河南洛阳 471009; 2. 长安大学公路学院, 西安 710064)

[摘要] 针对富水全、强风化砂岩的特点,进行了该砂岩的基本物理力学性质、化学成分实验,然后通过单轴、三轴压缩实验研究了爆破扰动、含水量、试样层理对砂岩应力-应变强度特性的影响。发现砂岩遇水软化,粘聚力大幅度降低,表现出显著的各向异性;爆破扰动后,岩石试样的单轴抗压强度减低,弹模减小,泊松比增大;由于砂岩具有明显的节理性,按两种方向加载所得到的岩石试样强度明显不同;根据实验所得应力-应变曲线特点,发现用修正的 Duncan-Zhang 模型可以很好地描述砂岩的前应力-应变曲线。

[关键词] 砂岩;含水量;强度;爆破扰动;节理;本构关系

[中图分类号] TU425 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)01-0074-07

## 1 前言

某新建铁路隧道围岩属强风化砂岩,隧道岩层产状  $310^{\circ} \angle 3^{\circ} \sim 280^{\circ} \angle 7^{\circ}$ ,岩层主要发育三组节理:①  $103^{\circ} \angle 78^{\circ}$  张节理,节理间距为 0.5~0.6 m,裂隙宽度为 1.5~2.0 mm,充填泥质,延长 2~3 m;②  $153^{\circ} \angle 80^{\circ}$  张节理,节理间距为 0.4~0.5 m,裂隙宽度为 1.5~2.0 mm,充填泥质,延长 4~5 m;③  $250^{\circ} \angle 66^{\circ}$  张节理,节理间距为 0.7~0.8 m,裂隙宽度为 0.8~1.0 mm,充填泥质,延长 5~8 m。

隧道顶部标高位于地下水稳定水位以下,地下水储量充沛,围岩裂隙发育,裂隙水流通性好,测得开挖面最大涌水量为 322 L/min,静水压力最高达到 0.7 MPa。全、强风化砂岩遇水后迅速软化,呈流

砂状,围岩自稳能力极差,隧道变形不易控制,加之隧道开挖采用爆破法,给隧道施工带来很大的风险,目前该类研究多集中在砂岩强度参数等方面,未见对风化富水砂岩力学特性的系统研究,对其研究多集中在风化程度的分级上,并无针对隧道施工的相关量化指标的研究。因此很有必要对强风化砂岩在富水情况下及考虑爆破作用下的力学强度特性进行研究,为该新建铁路隧道施工起指导作用,同时为其他同类工程积累规律性资料。

## 2 岩样化学成分分析与物理参数测试

笔者对该处砂岩化学成分进行了 X 射线衍射分析、pH 值测定。得出成分名称及含量如表 1 所示。

表 1 砂岩化学成分表

Table 1 Chemical composition of the sandstone

%

参数	成分										
	石英	钾长石	斜长石	蒙脱石	方解石	伊利石	滑石	赤铁矿	钛铁矿	绿泥石	其他
含量	64	11	8	5	3	2	2	2	1	1	1

[收稿日期] 2010-04-15

[作者简介] 邹 翀(1971—),男,江西南昌市人,高级工程师,主要从事工程技术及管理工作;E-mail: zouchong0356@126.com

通过成分鉴定可以得知,砂岩的主要成分为石英和各种长石、滑石、绿泥石等,石英和长石莫氏硬度处于矿物硬度的中等级别,而像绿泥石、滑石这样莫氏硬度很低的矿物虽然所占比例很小,但其强度低的性质致使整体岩样强度较低。另外,砂岩试样中存在绿泥石、滑石等矿物成分,一方面这些岩石易于风化和软化,降低岩石本身强度;另一方面这些具有滑感的矿物分布在结构面上,使结构面的抗剪强度大大降低,岩体易于沿结构面产生变形,使岩体失稳<sup>[1]</sup>。

为了解富水砂岩的物理力学性质,研究中进行了密度、吸水率、含水率以及耐崩解指数试验。测得富水砂岩的密度为  $2.172 \text{ g/cm}^3$ ,与岩石力学上砂岩密度的取值( $2.10 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ )进行比较,可知在砂岩中,本试验所取样的砂岩密度值较小,试验测得砂岩干密度  $\rho_a = 1.993 \text{ g/cm}^3$ ,土颗粒密度为  $\rho_s = 2.635 \text{ g/cm}^3$ ,由公式  $e = \rho_s / \rho_a - 1$  可得到孔隙比  $e = 0.322$  的土粒间孔隙大、接触不紧密,粒料间的咬合作用较弱,分子间引力小,剪切时克服的咬合作用小,因此原始内聚力就小。

岩石的吸水率是由其中空隙的数量和大小、颗粒相互排列的方式、岩石是否容易潮湿和从空隙中排除空气的情况等因素而定<sup>[2]</sup>。吸水率愈小,岩石愈紧密坚硬,岩石的吸水率愈大,则其工程性质就愈差。饱和吸水率试验程序是先将岩石试样充分浸水再烘干,浸水是通过煮沸浸水。由试验结果可知,取样砂岩的充分吸水率为  $7.38\%$ ,饱和吸水率为  $9.24\%$ ,值比较大,说明水对其影响明显,工程性质较差。

试验得到的砂岩的原状含水量为  $9.02\%$ ,而测得的充分吸水率仅为  $7.38\%$ ,这一方面与岩石在不同位置沉积的成分差异性有关,另一方面也从侧面证明了从工地现场取来的岩石试样几近饱和。况且在做吸水率实验时,由于有些试样在泡水的过程中已经沿着夹泥层散落掉了,而这些夹泥层中的粒径较小,更容易吸水,以上两个原因导致原状含水量比充分吸水量大。另外,测得试验砂岩饱和吸水率为  $9.24\%$ ,也可以看出试验砂岩在原状情况下含水量大,受水的影响肯定很大。

岩石的崩解性是指岩石与水作用时失去粘接力,变成完全丧失强度的松散物质的性能。这种现象是由于水化过程中削弱了岩石内部的结构联结引起的,岩石的崩解性一般用耐崩解性指数表示。耐

崩解性指数是通过对岩石试样进行烘干、浸水循环试验所得到的指数,它直接反映了岩石在浸水、温度变化和外界力的作用下抵抗风化作用的能力。较真实地模拟了岩石在自然条件下的风化过程。一般情况下,耐崩解指数与岩石成岩的地质年代无明显关系,而与岩石的密度成正比,与岩石的含水量成反比<sup>[3]</sup>。经过一次循环试验求得的耐崩解性指数是  $56.9\%$ ,两次循环试验求得的耐崩解性指数是  $38.2\%$ 。所以,可以将富水风化砂岩划分到低耐久性岩石类。

### 3 富水砂岩变形、强度特性试验研究

#### 3.1 单轴抗压强度试验

单轴抗压强度试验结果如表2所示。从微观上说是水使砂岩颗粒间自由水增加,结合水膜变厚,分子引力减小,从而使得颗粒之间更容易发生相对错动,宏观上表现为粘聚力降低,使得试验砂岩更容易变形<sup>[4]</sup>。在原状含水量和干燥情况下,轴向加载方向平行于试样层理和垂直试样层理所得的泊松比不一样。

表2 单轴抗压强度试验结果

Table 2 Results of uniaxial compression resistance test

试样及加载方向	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	软化系数
原状含水量、加载方向平行于试样层理	2.180	5.843	0.484	0.146
原状含水量、加载方向垂直于试样层理	5.745	13.256	0.402	0.204
干燥状态下、加载方向平行于试样层理	24.081	40.054	0.303	-
干燥状态下、加载方向垂直于试样层理	28.123	49.450	0.311	-

由表2中的数据可以看出,原状含水量时,加载方向平行于试样层理的单轴抗压强度比垂直于试样层理的小,前者与后者之比为  $38\%$ ;而在干燥情况下,二者之比为  $85.63\%$ 。在原状含水量下,加载方向平行试样层理时所得的弹性模量是垂直于试样层理的  $44\%$ ,在干燥情况下两者之比为  $81\%$ 。在原状含水量、干燥情况下,加载方向对所测得砂岩试样的泊松比影响不很显著。

#### 3.2 砂岩爆破扰动特性试验

钻爆法是山岭隧道修建中普遍采用的一种方

法,对于软弱围岩来说,爆破扰动使围岩强度指标显著降低<sup>[5]</sup>。在本次试验中,通过对爆破扰动试样及未受爆破扰动试样分别进行单轴压缩试验,得到了爆破扰动前、后应力-应变曲线以及轴向应变-径向应变曲线,以定量分析爆破扰动对该类围岩力学指标的影响。试验实测曲线如图1至图4所示。

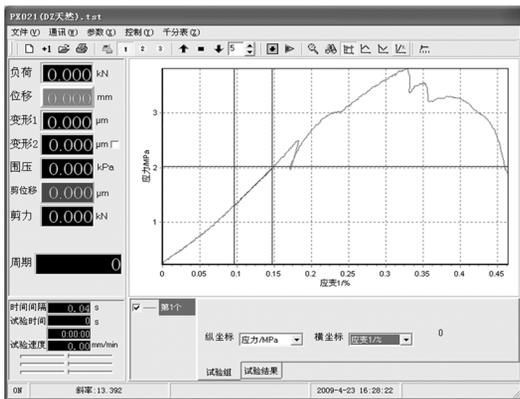


图1 未受爆破扰动试样的应力-应变曲线  
Fig.1 Stress-strain curve of specimen not disturbed by blasting

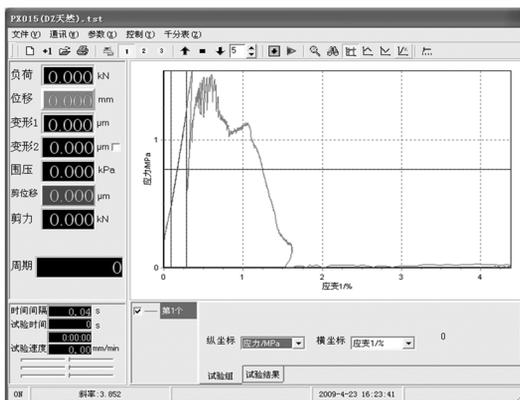


图2 受爆破扰动试样的应力-应变曲线  
Fig.2 Stress-strain curve of specimen disturbed by blasting

从图1至图4可以看出,受爆破影响的试样除了强度降低外,曲线形状变得更为复杂多变,这是爆破产生的裂缝在试验时多次张开闭合造成的。也可以看出,未经爆破的试样残余强度缓慢降低,而经爆破扰动后的试样残余强度迅速降低到零。经过比较可以发现,受爆破影响试样的单轴抗压强度是未经爆破扰动的38%,受爆破影响试样的弹性模量是未经爆破扰动的30%,爆破扰动后应变1和应变2都有显著增大,且泊松比也有相应的增加。由此可见,

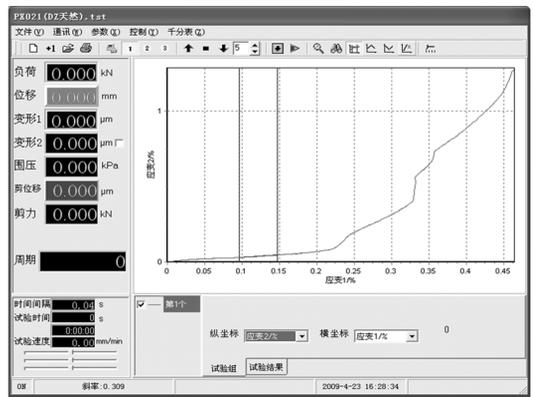


图3 未受爆破扰动试样的轴向应变-径向应变曲线  
Fig.3 Axial strain-radial strain curve of specimen not disturbed by blasting

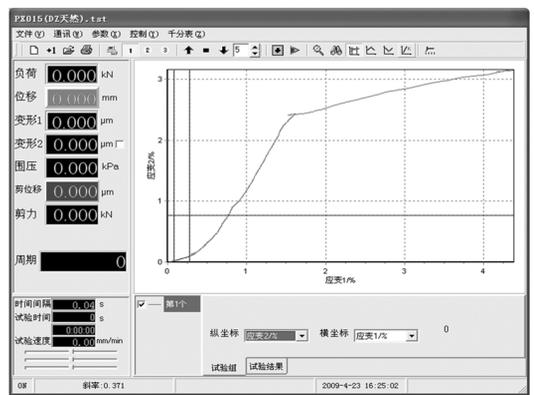


图4 受爆破扰动试样的轴向应变-径向应变曲线  
Fig.4 Axial strain-radial strain curve of specimen disturbed by blasting

爆破扰动使岩石的单轴抗压强度和弹性模量显著降低、泊松比明显增大。

### 3.3 砂岩软化特性试验

岩石的软化性是指岩石与水相互作用时强度降低的特性,与其矿物成分、颗粒间联结方式、空隙率以及微裂隙发育程度等因素有关。软化作用机理是由于水分子进入颗粒间的间隙,削弱了分子间引力,从而降低了颗粒间的联结<sup>[6]</sup>。对于一般的岩石,含水量增加导致强度明显降低。由试验数据可得出试样砂岩应力强度-含水量趋势线服从指数分布,如图5和图6所示,图中虚线为拟合曲线,实线为实验曲线。

试验砂岩泡水发生软化,主要有两个方面的原因。一方面,颗粒的吸水改变表面性能。砂岩成分中的绿泥石和泥质胶结物是亲水性的矿物,这些颗粒吸水后表面性能发生变化,使得颗粒间及颗粒与

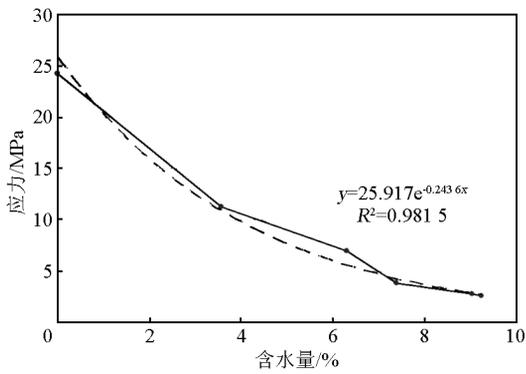


图5 加载方向平行于试样层理时的应力强度 - 含水量关系曲线

Fig. 5 Stress strength - water content curves for loading direction parallel to specimen bedding

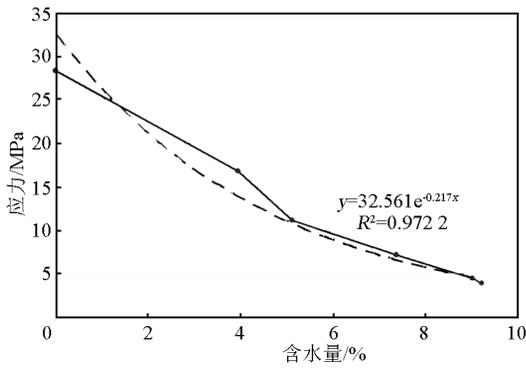


图6 加载方向垂直于试样层理时的应力强度 - 含水量关系曲线

Fig. 6 Stress strength - water content curves for loading direction perpendicular to specimen bedding

胶结物间的吸引力降低,产生弱化。另一方面,毛细管压力减小。岩样进行泡水前,内部含有部分水,产生毛细管压力;当岩样泡水后,外来水分子的加入使得这种作用力被减弱,从而使毛细管压力减小,产生弱化<sup>[7]</sup>。

### 3.4 砂岩三轴剪切试验

为进一步解释岩石在准三轴荷载作用下的破坏机理,对试样进行了一系列的三轴剪切试验,三轴实验曲线如图7至图11所示。从试验结果来看,砂岩在不同应力水平下的应力 - 应变曲线线形特征明显不同。当围压较小或是在单轴抗压情况下,曲线屈服点不明显,且峰值所对应的应变值比较小。当围压较大(为3 MPa)时,达到峰值后岩石经历一定的

塑性变形才被破坏,破坏后的应力降低速度较小,表现为峰值前、后曲线的曲率较大,应变软化不明显。试验结果如表3所示。

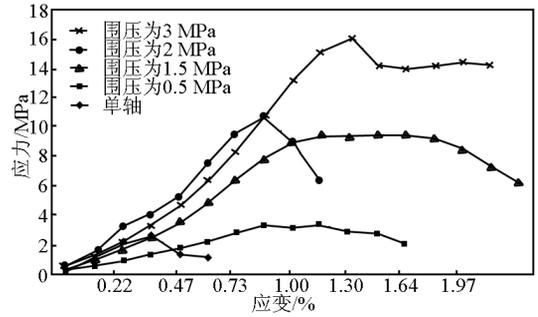


图7 原状试样、加载方向平行于试样层理条件下的应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress - strain curves of intact sandstone for loading direction parallel to the bedding of specimen

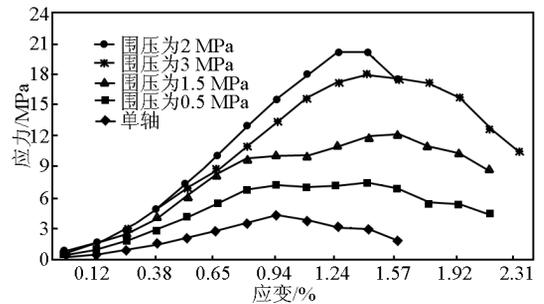


图8 原状试样、加载方向轴向垂直于试样层理时的应力 - 应变曲线

Fig. 8 Stress - strain curves of intact sandstone for loading direction perpendicular to the bedding of specimen

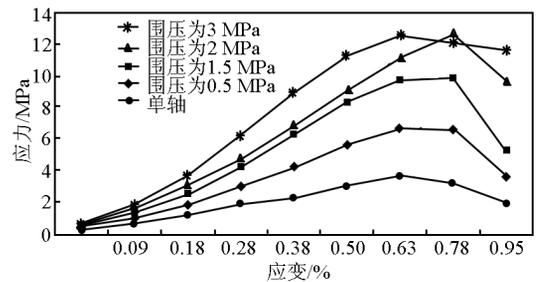


图9 充分吸水、加载方向轴向平行于试样层理时的应力 - 应变曲线

Fig. 9 Stress - strain curves of sandstone absorbed water fully for loading direction parallel to the bedding of specimen

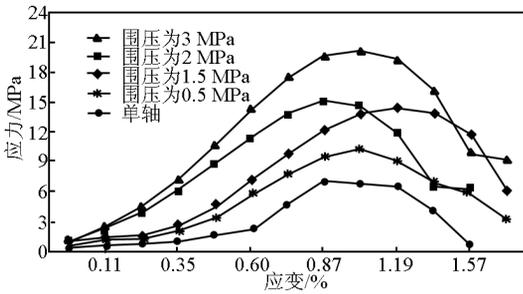


图 10 充分吸水、加载方向垂直于试样层理时的应力 - 应变曲线

Fig. 10 Stress - strain curves of sandstone absorbed water fully for loading direction perpendicular to the bedding of specimen

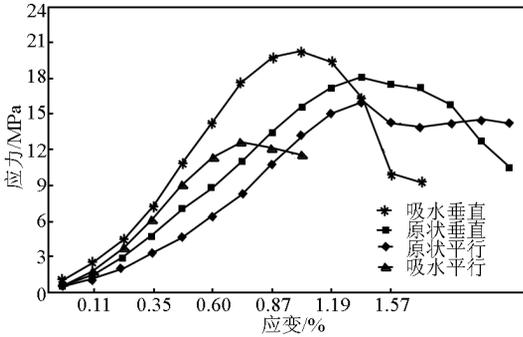


图 11 围压为 3 MPa 时的应力 - 应变曲线  
Fig. 11 Stress - strain curves when all round pressure equals 3 MPa

表 3 三轴剪切试验结果

Table 3 Results of triaxial shear test

试样及加载方向	抗压强度/MPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
原状含水量、加载方向平行于试样层理	15.94	1.01	38
原状含水量、加载方向垂直于试样层理	18.31	1.32	42
饱和状态下、加载方向平行于试样层理	15.94	1.5	37
饱和状态下、加载方向垂直于试样层理	19.36	1.82	42

从表 3 可以得出以下结论:

1) 相同围压下的原状含水量试样在应变相等时,轴向加载方向平行于试样层理时,所得主应力差比轴向加载方向垂直于试样层理时所得的主应力差小。

2) 通过图 5 和图 6 可以看出,含水量增大,试样

的强度降低很多,表现在强度指标的变化上,加载方向平行于试样层理时的粘聚力和内摩擦角都比同种含水量下加载方向垂直于试样层理的小。而含水量的变化几乎对内摩擦角影响不大,但是对粘聚力的影响很大,试样的含水量增大,砂岩的粘聚力显著降低。在以上 4 种试验条件下,砂岩的全过程应力 - 应变曲线皆呈应变软化或弱软化型<sup>[8]</sup>。

#### 4 富水砂岩本构关系研究

结合试验数据,研究中选取 Duncan 本构模型来描述砂岩的力学性质。虽然试验砂岩全过程中,应力 - 应变曲线不大符合 Duncan - Zhang 方程曲线,但是在峰值点之前还是适用的<sup>[9]</sup>。尽管 Duncan - Zhang 模型不能考虑初始压密阶段时应力 - 应变特性,也不能反映峰值应力之后的残余强度<sup>[10]</sup>,但是若将 Duncan 模型的双曲线方程改为式(1):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_1^2} \quad (1)$$

式(1)中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别代表大主应力和小主应力;  $a$ 、 $b$  为试验常数;  $\varepsilon_1$  为大主应力方向的变形,即主应变。

对式(1)关于  $\varepsilon_1$  微分,则切线模量  $E_1$  可表示为

$$E_1 = \frac{a - c\varepsilon_1^2}{[a + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_1^2]^2} \quad (2)$$

由试验数据可以求出不同情况下、不同围压所对应的  $E_0$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$  和  $\xi_{1m}$  [ $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$  为大主应力和小主应力差值的峰值,  $m$  代表 max;  $\xi_{1m}$  为最大主应变]以及参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ 。

由试验数据可得出试验砂岩的应力 - 应变关系曲线,残余强度在实际应用中作用微弱,研究只将峰值之后的趋势表达出来即可。将修正后的模型参数代入本构方程中,可计算出砂岩应力 - 应变曲线,计算曲线如图 12、图 13 所示。

从图 12 和图 13 可以看出,对砂岩三轴压缩应力 - 应变曲线采用改进的 Duncan 模型进行拟合,试验曲线与理论曲线非常接近,同时求解过程更简单。可见,用改进的 Duncan - Zhang 模型能更好地表达试验砂岩的应力 - 应变关系。

#### 5 结语

1) 该砂岩属级配不良细砂,可塑性较差。崩解性实验表明,该岩石属于低耐久性岩石,主要成分为石英和各种长石、滑石、绿泥石等。由于绿泥石、滑

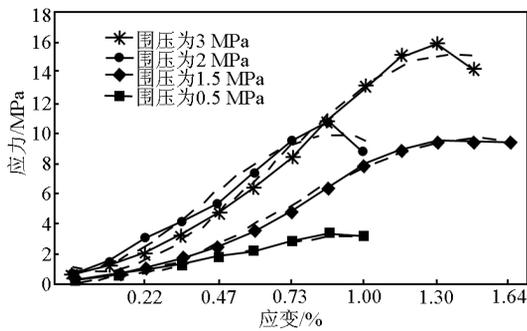


图 12 试验与计算结果对比  
(加载方向平行于试样层理)

Fig. 12 Comparison between experiment and prediction for loading parallel to the bedding of specimen

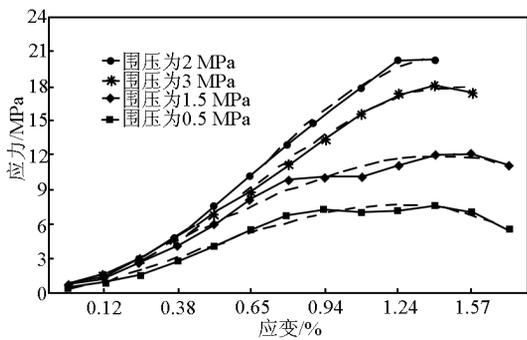


图 13 试验与计算结果对比  
(加载方向垂直于试样层理)

Fig. 13 Comparison between experiment and prediction for loading direction perpendicular to the bedding of specimen

石硬度低,属于易风化矿物,具有滑感,隧道开挖后围岩及其结构面的抗剪强度都大为降低,易使围岩失稳。

2)通过单轴抗压强度试验得出原状含水量下加载方向平行于试样层理、垂直于试样层理以及干燥状态下加载方向平行于试样层理、垂直于试样层理时岩样的岩石强度、弹性模量、泊松比以及软化系数。以上 4 种加载情况得到的压缩曲线皆呈应变软化型。

3)通过岩石三轴剪切试验得到了在原状含水量下加载方向平行于试样层理、垂直于试样层理以

及充分吸水加载方向平行于试样层理、垂直于试样层理时岩样的粘聚力和内摩擦角。从强度指标的变化方面可以得出,加载方向平行于试样层理时的粘聚力和内摩擦角都比同样含水量下加载方向垂直于试样层理的小。而含水量的变化几乎对内摩擦角无影响,但是对粘聚力的影响很大,试样的含水量增大,砂岩的粘聚力降低很多。砂岩的全过程应力 - 应变曲线皆呈应变软化型。

4)爆破扰动使得试样强度、弹性模量降低很多,泊松比增大,曲线线型变得更为复杂,这就意味着爆破扰动后围岩更容易发生变形。根据这一特性,在隧道施工中应用试验分析的爆破扰动曲线调整爆破方案,在掌子面周边增加隔震空孔,增加装药的不耦合系数,最大程度地降低了爆破对围岩的扰动影响,提高了围岩的自稳能力,保障了施工安全。

5)用修正的 Duncan - Zhang 模型可以很好地模拟砂岩的前过程应力 - 应变曲线关系,其计算值与实验结果吻合得相当好。

#### 参考文献

- [1] 巫锡勇, 罗 健, 魏有仪. 岩石风化与岩石化学成分的变化研究[J]. 地质与勘探, 2004, 40(4): 85 - 88.
- [2] 大见美智人, 本田彰义, 青柳省吾, 等. 风化安山岩的的、物理的性质的关系について[J]. 应用地质, 1975, 16(4): 169 - 177.
- [3] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [4] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006: 52 - 55.
- [5] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [6] 张立新, 李长洪. 砂卡岩软化特性及其力学试验研究[J]. 现代矿业, 2009(2): 56 - 59.
- [7] 吴景浓. 地壳岩石的渗透性状及孔隙水对岩石力学性质的影响[J]. 华南地震, 1990, 10(3): 77 - 82.
- [8] 易顺民, 赵文谦. 单轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 479 - 520.
- [9] Duncan J M, Chang C Y, et al. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1970, 96 (SM5): 1629 - 1653.
- [10] Feng Weixing, Chang Shaodong, Hu Wangyi. A study of parameter test on fine clay soil in Beijing using the model by Duncan and Chang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 327 - 330.

# Experimental investigation on strength of sandstone weathered and absorbed water heavily and its constitutive law

Zou Chong<sup>1</sup>, Lei Shengyou<sup>2</sup>, Yue Xijun<sup>2</sup>, Song Yan<sup>1</sup>, Gao Pan<sup>1</sup>

(1. Technology Center, China Railway Tunnel Group, Luoyang, Henan 471009, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

[**Abstract**] According to the feature of sandstone weathered and absorbed water heavily, the authors analyzed the physical and mechanical properties and chemical composition of the sandstone experimentally, then studied influence of blasting disturbance, water content, sample bedding on stress-strain strength characteristics through uniaxial and triaxial compression tests, and found that the sandstone would become weak in the strength when it absorbed water, and its cohesion decreased and showed significant anisotropy while friction angle was not changed. After the sandstone underwent blasting, its uniaxial compressive resistance and elastic modulus decreased, and Poisson ratio increased. As the sandstone has obvious bedding properties, the strengths of sample obtained from two different loading directions are different obviously. Based on the stress-strain curves from the triaxial tests, the authors found the stress-strain curves could be described well by the modified Duncan-Zhang model.

[**Key words**] sandstone; water content; strength; disturbed by blasting; bedding; constitutive law