DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.016

马福荣,张信贵,易念平.取样卸荷对膨胀性泥岩强度与变形特性影响的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 109-116. (MA Furong, ZHANG Xingui, YI Nianping. Experimental study of unloading impact on deformation behavior and strength of mudstone in sampling state[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 109-116. (in Chinese))

# 取样卸荷对膨胀性泥岩强度与变形 特性影响的试验研究

# 马福荣,张信贵,易念平

(广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:**泥岩强度和变形参数是工程设计与施工控制的重要指标。为研究卸荷作用和水岩作用对膨胀性泥岩强 度和变形特性的影响程度,选取南宁盆地典型膨胀性泥岩为研究对象,进行了加卸荷剪切试验和无荷膨胀率试 验,在此基础上,分析了卸荷泥岩强度变化规律,探讨了水岩作用对卸荷泥岩变形特性的影响程度。试验结果 表明,卸荷作用引起泥岩强度降低,压缩性增大,相比于加载条件,卸荷状态下泥岩的黏聚力明显较高,而内摩 擦角则相对较小。引入卸荷比和强度损失率分析了卸荷泥岩的强度变化规律,卸荷泥岩强度损失率随卸荷比 增加而增大,当卸荷比为0.7~0.8时,泥岩强度损失率最大。相对于卸荷作用,水岩作用对泥岩变形特性的影响 较大,对样品的损伤约占 30%~65%。研究结果表明获取试样力学参数中不能忽略取样过程对泥岩强度和变形 特性的影响。

**关 键 词:** 泥岩; 取样卸荷; 应力路径; 强度; 变形 中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:**1009-640X(2017)05-0109-08

取样过程中存在着三类扰动作用,即机械扰动、应力释放和水岩作用<sup>[1]</sup>。对膨胀性泥岩而言,该三类扰 动是影响获取泥岩样品相关参数中最重要的影响因素。机械扰动、应力释放会加速泥岩样品裂隙扩张,为水 岩作用开辟通道。由于泥岩具有遇水膨胀失水收缩的特性,水作用将引发泥岩表层膨胀、崩解甚至泥化,尤 其是干湿循环后膨胀、崩解进一步加剧,导致泥岩样品品质降低。卸荷样品与原位样品的力学性质和变形特 性存在显著不同<sup>[2-3]</sup>。因此,在水岩作用的基础上探讨卸荷对膨胀性泥岩性质的影响规律,可获取可靠的试 验参数用于工程实践。

岩体工程在加载与卸载条件下,其力学特性截然不同。许多学者对卸荷硬岩体的变形特性、力学性质及 破坏模式进行了研究,取得了一系列成果。王璐等<sup>[4]</sup>结合锦屏二级深埋引水隧洞工程,对大理岩进行了常 规和卸荷三轴试验,发现卸荷应力状态下纵横向应变较常规状态小,内聚力降低,摩擦角增大。张凯等<sup>[5]</sup>从 卸荷速率分析了卸荷速率对大理岩强度的影响,指出围压卸荷速率越大,岩样强度越高,卸荷点处于弹性范 围内,应力路径对强度的影响不明显。张成良等<sup>[6]</sup>对辉绿岩进行加、卸荷三轴试验,指出相对于加载状态, 卸荷状态脆性破坏特征明显,体积扩容加剧。严鹏等<sup>[7]</sup>从取样损伤的角度,研究了深部高应力区岩样获取 方法,提出了一种低应力取样方法,即套钻取样,可以有效提高样品强度。赵国彦等<sup>[8-9]</sup>从不同应力路径的 角度对花岗岩进行了三轴卸荷试验,指出卸载状态下侧向扩容显著。黄伟等<sup>[10]</sup>结合锦屏水电枢纽二级水电 站交通辅助洞的绿泥质砂岩工程,进行高围压条件下岩石卸荷试验,得到了岩石卸荷扩容特性和卸荷本构模

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFB018002); 广西高校中青年教师基础能力提升项目(KY2016YB586) 作者简介: 马福荣(1978—), 男, 广西资源人, 副教授, 博士研究生, 主要从事软岩工程及基础工程等方面的教学和科 研工作。E-mail: mfrong2004@163.com

型。郭印同等<sup>[11]</sup>结合金坛地下盐穴储气库工程,进行了卸围压三轴试验,得到了盐岩卸围压过程的应力-应 变关系和变形特征。李栋伟等<sup>[12]</sup>通过先固结后径向卸载的三轴剪切试验方法模拟煤矿泥岩巷道开挖过程 中应力状态变化,获得了软岩弹黏塑本构力学模型。原先凡<sup>[13]</sup>和王宇等<sup>[14]</sup>分别对砂质泥岩和泥质砂岩进 行了三轴卸荷流变试验,建立了软岩卸荷流变本构模型。邓华锋等<sup>[15]</sup>对砂质泥岩进行了三轴加、卸载试验, 研究了泥岩加、卸荷抗压强度取值问题,提出半对数数据分析法确定软岩强度。

以上研究主要对卸荷硬岩力学特性和变形规律进行研究,但对浅部工程卸荷泥岩的力学性质与变形特性的研究并不多见,尤其是对卸荷膨胀性泥岩的研究涉及较少。因此,开展水岩耦合作用下卸荷泥岩力学行为与变形特性的研究有重要意义。本文针对南宁盆地灰色膨胀性泥岩,经室内模拟取样过程,开展加、卸荷剪切试验和无荷膨胀率试验,研究水岩作用下卸荷泥岩的强度和变形特性及其变化规律。

1 试验方案及试验条件

#### 1.1 试验准备

试样取自南宁某建筑基坑,取样深度为8~15 m,在 基坑处采用人工开挖法取样。采用保鲜膜包裹试样,装 于充填纸屑和海绵的泡沫箱中运输,利用钢丝锯和切土 刀切取试样,降低对泥岩的扰动。拟进行加、卸载的直 接剪切试验和无荷膨胀率试验。加、卸载直接剪切试验 采用 ZJ 型应变控制式直剪仪,采取快剪试验方法,依据 《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)(以下简称 《标准》),剪切速率采用 0.8 mm/min,无荷膨胀率试验 采用固结仪。试样按照《标准》加工成直径 61.8 mm, 高 20 mm 的土饼样品,泥岩样品如图 1 所示。



图 1 泥岩试样 Fig.1 Samples of mudstone

#### 1.2 试验方案

(1)加载试验。法向应力分别为 100,200,300,400 kPa 作用下进行快剪试验,获得加载状态下的  $\tau$ - $\sigma$  曲 线和抗剪强度指标。

(2)卸载试验。首先对泥岩试样分别在不同垂直荷载(100,200,300,400 kPa)作用下进行固结试验,然 后逐级卸载,待每级卸载稳定后进行剪切试验,获得卸载状态下的 *τ* ′-σ′曲线和抗剪强度指标。卸载试验具 体情况见表 1。

Tab. 1 Test conditions of unloading								
<b>去</b> 赴你田大子	<b>世日( 今 物</b> )	竖向荷载		田好华宫栏水上如芜华宫栏水				
何致作用力式	杆亏(1'奴)	P <sub>1</sub> /kPa	$P_2/kPa$	一 回宕梞足你在与邱何梞足你在				
	XZ-1(2)	100	100→25					
知恭佐田	XZ-2(4)	200	200→25	固结和卸荷稳定标准为每级荷载作用下,每小时变形低于				
即软作用	XZ-3(6)	300	300→25	0.01 mm,且连续出现2次以上,即可进行下一步试验				
	XZ-4(8)	400	400→25					

表1	卸载试验情况						
-							

注: P1 为固结压力, P2 为剪切时作用在试件上的法向压力。"→"表示卸载过程, 每级卸荷量为 50 kPa, 最后一级压力为 25 kPa。

(3)为考虑取样时水对泥岩的影响,从膨胀与变形的角度设计了水岩作用对卸荷泥岩变形特性影响的 试验。一是进行原状样品的无荷膨胀率试验;二是进行卸荷样品的无荷膨胀率试验,分别获取无荷膨胀率δ。 与物理性质指标。 2 应力路径与强度

#### 2.1 取样卸荷的应力状态分析

天然状态岩土体是三相受力体,取样卸荷过程中,深处土体应力随上覆土层的卸除而产生变化,并发生重分布。钻孔底部下某深度处土体单元A点的受力过程如图2所示,应力重分布过程如图3所示。应力重分布过程即是泥岩内部能量释放过程,这一过程致泥岩内部裂隙增大,结构受损,从而降低了泥岩样品的强度。

 $0 | B'_{3}B'_{2}B'_{1}$ 

 $\sigma_3(\overline{A})$ 

 $\overline{B}$ ,  $B_{2}$ 

图 3 A 点卸荷过程的应力摩尔圆

Fig. 3 Mohr's circles in unloading stress process





#### 2.2 应力路径与强度分析

南宁盆地泥岩具有较强的超固结性<sup>[16]</sup>,前期固结压力远 高于第四系硬土,在一定程度上影响着泥岩强度。图 4 为超 固结状态下的三轴固结不排水剪切试验的应力路径,图中 p = $(\sigma_1 + \sigma_3)/2, q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, \sigma_1, \sigma_3 分别为大小主应力, p, q$ 为总应力, p', q' 为有效应力。图中 A 表示天然原位状态即  $K_0$ 状态, B 表示取样卸荷后的状态, C 表示对试样进行等向固结 后的状态。AF 为原状土的总应力路径, ABD 为卸荷样品的总 应力路径, ABCE 为等向固结样品的总应力路径。BD', CE',AF' 为有效应力路径。卸荷样品强度(D 点)和等向固结样品强度(E 点)远小于原状土强度(F 点)。由应力路径分析可知

卸荷对试样的初始影响不可忽略,必须考虑卸荷对泥岩强度及变形的影响。室内试验用样为卸荷样品,试验 参数值过低,常常无法被工程所利用的现象时有发生。

3 卸荷泥岩的强度变化分析

#### 3.1 试验内容

本试验利用五联直接剪切试验仪,通过室内试验模拟取 样卸荷过程,其应力路径为固结-卸荷-快剪,应力路径如图 5 所示,图中p,q意义同上。 $O \rightarrow A$ 点为固结压力下的固结过 程, $A \rightarrow B \rightarrow C$ 为卸荷、稳定过程, $C \rightarrow D$ 为剪切过程。试验分为 加载试验和卸荷试验。

试验样品的基本物理性质指标如表2所示。样品分为两

大组,一组样品进行卸载试验,在先期固结压力 *P*<sub>1</sub>作用下进行固结,待固结稳定时,进行卸荷,每级卸荷量为 50 kPa,最后一级卸荷量为 25 kPa,终级卸荷至 25 kPa,待卸荷稳定后,进行快剪试验,并获得不同先期固结 压力、不同卸荷等级下的抗剪强度;另一组样品进行加载试验,剪切试验时作用在试样上的法向压力分别为



图 5 卸荷直接剪切应力路径 Fig. 5 Stress parth for unloading direct shear test



Fig. 4 Stress parth for a consolidated-undrained triaxial test on overconsolidated soil

#### 100,200,300,400 kPa,并获得加载条件下的抗剪强度。

#### 表 2 泥岩物理性质指标

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of mudstone

天然含水量 ω/%	重度 γ/(kN・m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	饱和度 $S_r / \%$	液限 $\omega_L / \%$	塑限 ω <sub>P</sub> /%	液性指数 $I_{\rm L}$	塑性指数 I <sub>P</sub>
19.6	21.1	0. 565	93.0	41.9	20.3	-0.05	21.6

#### 3.2 卸荷泥岩力学性质分析

加、卸载作用下的抗剪强度试验结果如图 6 所示。 由图 6 可知,加载状态下的抗剪强度包络线呈近似直线 变化,其黏聚力 c 为 241.3 kPa,内摩擦角 φ 为 39.1°。 卸荷状态下泥岩抗剪强度包线基本位于加载抗剪强度 包线上方,并呈曲线变化。各卸荷作用下的抗剪强度指 标见表 3,比较加、卸荷作用下的抗剪强度指标可知,卸 荷状态下的黏聚力均大于加载状态,而卸荷状态下的内 摩擦角均小于加载状态。卸荷状态下的内摩擦角随固 结压力变化而小幅度波动,而黏聚力受固结压力的影响 较大。

为进一步弄清取样卸荷对泥岩强度损失程度问题, 在此引入卸荷比 R<sup>[6]</sup>并提出强度损失率 P,来进行分 析。卸荷比R为固结压力与剪切时作用在试样上的法 向压力之差与固结压力的比值,即  $R = (P_1 - P_2)/P_{10}$ 强度损失率 P.是从泥岩微、宏观结构方面表征取样卸 荷效应对泥岩强度影响的指标,是固结压力下的抗剪强 度 $\tau_{\iota}$ 与卸荷后的抗剪强度 $\tau'_{\iota}$ 之差与固结压力下的抗剪 强度 τ, 的比值。由图 7 可以看出:随着卸荷比增加,强 度损失率逐渐增大,且卸荷初期,卸荷比与强度损失率 呈近似线性关系,之后呈曲线变化。由于初期卸荷量 小,卸荷回弹量可忽略不计,其对泥岩强度的影响不大。 随着卸荷比的增加,泥岩表层裂隙增多,微裂隙逐渐微 张,水岩作用通道打开,致使泥岩内部小区域结构发生 破坏。当卸荷比增大到 0.7~0.8 时,强度损失率急速 增大,泥岩内部微裂隙连穿贯通,水岩作用强烈,内部结 构严重受损,强度降低,变形增大。

#### 500 400 加荷点 $\tau/kPa$ 300 300 200 200 100100 500 100 200 300 400 $\sigma/kPa$

600

### 图 6 加、卸状态下泥岩强度关系曲线



表 3 卸载试样抗剪强度指标

#### Tab. 3 Shear strength index of unloading samples

固结压力 P <sub>1</sub> /kPa	黏聚力 c/ kPa	内摩擦角 φ/°
100	275.6	28.9
200	299.3	26.9
300	331.7	30.6
400	363.1	29.4





Fig. 7 Variations of loss rate of strength and unloading ratio

# 4 水岩作用对卸荷泥岩变形特性的影响

前面提到取样过程存在着三类扰动作用,而室内试验时不考虑取样阶段卸荷回弹和膨胀变形对样品的 初始影响,从而直接影响到泥岩的变形特性,因此,不能忽略卸荷与水岩作用对泥岩样品变形特性的影响。

#### 4.1 试验内容

利用固结仪模拟卸荷回弹与水岩作用下的变形,研究产生过程及量值变化。试验内容为原状样品的无荷载膨胀率试验和对样品进行预压固结后的无荷载膨胀率试验。无荷载膨胀率试验是指测定原状土或扰动 土在无荷载有侧限条件下的膨胀率试验。原状样品试验:在固结仪内安装试样,自下而上向容器内注入纯 水,并保持水面高出试样 5 mm,注水后每隔 2 h 测记竖向位移 1 次,直至 2 次读数差值不超过 0.01 mm,认为 膨胀稳定,记下最终变形量。预压固结样品试验:首先 在固结仪中施加竖向固结压力,对样品进行固结,待固 结稳定后测记竖向变形量,然后卸荷,待试样变形稳定 后测记回弹变形量,接着向容器内注入纯水,进行无荷 膨胀率试验,试验方法同原状样品,固结与卸荷作用下 的变形情况如表4所示。试验结束后均测定试样的含 水量和密度。

#### 表 4 固结与卸荷作用下的变形量

Ta	.D. 4	Deformatio	Deformation under consolidation and unloading						
样号	固结压力	固结变	卸荷稳定	回弹量/					
	1	$P_0/kPa$	形量/mm	变形量/mm	mm				
1		100	1.03	0.87	0.16				
2		200	1.25	0.64	0.61				
3		300	1.75	1.26	0.49				
4		400	1.65	0.77	0.88				

#### 4.2 取样过程对泥岩初始变形的影响分析

取样卸荷模拟试验的变形情况如表 5 所示。原状

样品室内无荷膨胀率试验得到的竖向变形量记为损伤样品膨胀变形量,用△D表示。对原状样品进行预固 结处理后的无荷膨胀率试验得到的竖向变形量记为非损伤样品膨胀变形量,用△S表示,△H为卸荷回弹变 形量。通过模拟取样过程对岩样变形的影响可知,在卸荷和水岩作用下样品的变形量为(△S+△H-△D), 非损伤样品总变形量为(△S+△H)。用结构损伤度表征水岩作用和卸荷作用分别对泥岩试样变形的影响程 度,由表5可知,水岩作用对泥岩试样的影响较大,结构损伤度(△D/(△S+△H))约达30%~65%。相对于 水岩作用的影响,卸荷作用对试样变形的影响较小,结构损伤度(△H/(△S+△H))约为4%~21%。比较样 品损伤前后膨胀变形量试验结果可知,取样扰动损伤后样品的膨胀变形量远小于非损伤样品,且随着固结压 力的增加,损伤影响显著增加。

#### 表 5 取样卸荷作用模拟试验的泥岩变形情况

Tab. 5 Deformation of mudstone under unloading

样号	损伤样品膨胀 变形量/mm	非损伤样品膨胀 变形量/mm	卸荷回弹 变形量/mm	非损伤样品总 变形量/mm	水岩作用损伤度/%	卸荷作用损伤度/%
1	1.93	3. 56	0.16	3.72	51.88	4.30
2	2.63	3.93	0.61	4. 54	57.93	13.40
3	2.10	2.72	0.49	3. 21	65.42	15.26
4	1.27	3. 32	0.88	4. 20	30. 24	20.95

#### 原状样品和卸荷样品的无荷膨胀率试验指标见表6。

表6 无荷膨胀率试验指标

Гab. б	Physical	parameters	of	unloaded	swelling	ratio	test
--------	----------	------------	----	----------	----------	-------	------

原状样品物理指标				原状样品无荷膨胀率试验指标				卸荷样品无荷膨胀率试验指标			
样号	含水量/ %	密度/ (g・cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	含水量/ %	密度/ (g・cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	无荷膨 胀率/%	含水量/ %	密度/ (g・cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	无荷膨 胀率/%
1	27.16	2.10(1.65)	0.666	36.12	2.23(1.64)	0.682	9.65	36.63	2.18(1.60)	0.723	18.63
2	22.96	2.11(1.71)	0. 588	33.30	2.27(1.70)	0.600	13.16	36.24	2.24(1.65)	0.654	20. 62
3	24.26	2.11(1.70)	0. 622	30.69	2.15(1.63)	0.687	9.52	31.04	2.19(1.65)	0.671	14.15
4	21.84	2.11(1.73)	0. 588	27.26	2.23(1.75)	0. 570	6.33	29. 29	2.21(1.71)	0.612	16. 75

注:()中值为相应干密度。

由表 6 可知,原状样品的吸水量为 8.96, 10.34, 6.43, 5.42 g,卸荷样品的吸水量为 9.47,13.28,6.78, 7.45 g。比较吸水量可知,卸荷样品的吸水量明显高于原状样品。相同吸水量下,卸荷样品的膨胀率大于原 状样品,且膨胀率随吸水量的增加而增大,如图 8 所示。由膨胀率与时间关系曲线(图 9)可知,卸荷样品吸 水膨胀时间和无荷膨胀率均大于原状样品,卸荷作用致使泥岩膨胀性增强了,吸水能力增大了。

一般地,膨胀量与它的起始含水量和密实程度相关,但即使所有条件一致,最终膨胀量大小也与是否能

充分吸水有关,即使具有较高的膨胀潜势,也不能充分吸水,实际产生的膨胀变形必然是不够充分的。

由此可见,取样卸荷对泥岩强度与变形的影响表现 在两个方面,一是微观影响,因卸荷致泥岩内部结构、连 接发生破坏,结构重组,其黏聚力降低明显。取样时的水 岩作用由外及里逐渐弱化了泥岩的胶结物,破坏了泥岩 颗粒间的胶结作用,其结构强度有逐渐减小并消失的趋 势,且水作用使土颗粒水膜增厚,颗粒间引力占优势,泥 岩更易膨胀和收缩。二是宏观影响,取样的扰动作用对 泥岩结构的影响在宏观上表现出来的是压缩性增大,可







恢复变形减小,且所有宏观上表现出来的不可逆和力学性能的降低归根结底是其结构损伤的结果。



百9 小石中用于廖瓜平马时间的人永面线



## 5 结 语

对南宁盆地灰色膨胀性泥岩卸荷应力路径与强度的分析表明,取样卸荷对样品室内参数的影响是不可 忽略的。对泥岩样品加、卸荷试验表明,随着卸荷比增加,强度损失逐渐增大,且在卸荷初期,卸荷比与强度 损失率呈近似线性关系,当卸荷比为0.7~0.8时,泥岩强度损失率最大。卸荷作用与水岩作用共同影响下 的试验研究表明,卸荷样品的吸水量明显高于原状样品。相同吸水量下,卸荷样品的膨胀率大于原状样品的 膨胀率,卸荷作用使试样最终膨胀量增大。取样卸荷过程从微、宏观方面影响了泥岩强度和变形特性,水岩 作用对泥岩初始变形的影响大于卸荷作用,其对样品的损伤约占 30%~65%。

#### 参考文献:

- [1] 马福荣,李芒原,陈青生,等.南宁盆地第三系泥岩参数试验方法改进[J]. 广西大学学报(自然科学版),2008,33(2):
  128-132. (MA Furong, LI Mangyuan, CHEN Qingsheng, et al. Improvement on testing method for parameters of the mudstone of tertiary in Nanning basin[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2008, 33(2): 128-132. (in Chinese))
- [2] CARRUBBA P. Stress relief disturbance and residual pore pressure in cohesive soils [J]. Soils and Foundations, 2000, 40(1): 57-72.
- [3] WATABE Y, TSUCHIDA T. Influence of stress release on sample quality of pleistocene clay collected from large depthin Osaka bay[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(4): 17-24.
- [4] 王璐, 刘建锋, 杨昊天, 等. 深埋大理岩卸荷力学特性的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 46-51. (WANG Lu, LIU Jianfeng, YANG Haotian, et al. Experimental research on mechanical properties of deeply buried marble

under unloading conditions [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(2): 46-51. (in Chinese))

- [5] 张凯,周辉,潘鹏志,等.不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2072-2078. (ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2072-2078. (in Chinese))
- [6] 张成良,杨绪祥,余贤斌. 加卸荷条件下辉绿岩岩体力学参数特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 280-285. (ZHANG Chengliang, YANG Xuxiang, YU Xianbin. Experimental study of diabase mechanical properties by tri-axial loading and unloading tests[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 280-285. (in Chinese))
- [7] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 高应力取芯卸荷损伤及其对岩石强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 681-688. (YAN Peng, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Coring-induced unloading damage to rock samples under high stress condition and its impact on rock strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 681-688. (in Chinese))
- [8] 赵国彦, 戴兵, 董陇军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3121-3128. (ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun, et al. Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock of triaxial unloading tests under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3121-3128. (in Chinese))
- [9] 张楚旋, 戴兵, 吴秋红. 不同应力路径下岩石卸荷破坏过程的变形特性与能量耗散分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(10): 35-40. (ZHANG Chuxuan, DAI Bin, WU Qiuhong. Analysis on deformation properties and energy dissipation of rock unloading failure process under different stress path[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(10): 35-40. (in Chinese))
- [10] 黄伟, 沈明荣, 张清照. 高围压下岩石卸荷的扩容性质及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3475-3481. (HUANG Wei, SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study of unloading dilatancy property of rock and its constitutive model under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl2): 3475-3481. (in Chinese))
- [11] 郭印同,杨春和,付建军.盐岩三轴卸荷力学特性试验研究[J].岩土力学,2012,33(3):725-731.(GUO Yintong, YANG Chunhe, FU Jianjun. Experimental research on mechanical characteristics of salt rock under triaxial unloading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):725-731.(in Chinese))
- [12] 李栋伟, 汪仁和, 范菊红. 基于卸荷试验路径的泥岩变形特征及数值计算[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 387-391. (LI Dongwei, WANG Renhe, FAN Juhong. The deformation properties of mudstone and numerical calculation based on unloading path[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 387-391. (in Chinese))
- [13] 原先凡,邓华锋,李建林. 砂质泥岩卸荷流变本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1733-1739. (YUAN Xianfan, DENG Huafeng, LI Jianlin. Unloading rheological constitutive model for sandy mudstone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1733-1739. (in Chinese))
- [14] 王宇,李建林,邓华锋,等. 软岩三轴卸荷流变力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3338-3345.
  (WANG Yu, LI Jianlin, DENG Huafeng, et al. Investigation on unloading triaxial rheological mechanical properties of soft rock and its constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3338-3345. (in Chinese))
- [15] 邓华锋,原先凡,李建林,等.软岩三轴加-卸载试验的破坏特征及抗压强度取值方法研究[J]. 岩土力学,2014,35
  (4):959-966. (DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Research on failure characteristics and determination method for compressive strength of soft rock in triaxial loading and unloading tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 959-966. (in Chinese))
- [16] 张信贵,易念平,黄绍铿.南宁盆地泥岩承载性状研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):357-360. (ZHANG Xingui, YI Nianping, HUANG Shaokeng. Research on the bearing properties of mudstone in Nanning basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 357-360. (in Chinese))

# Experimental study of unloading impact on deformation behavior and strength of mudstone in sampling state

MA Furong, ZHANG Xingui, YI Nianping

(College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The strength and deformation characteristics of mudstone are important reference indexes in the engineering design and construction management. In order to analyse the effect of water-rock interaction and unloading on the strength properties and deformation characteristics of expansive mudstone, the sample of typical expansive mudstone in Nanning basin is chosen for the loading and unloading shear test and unloaded expansion ratio test. The intensity change rule of unloading mudstone is analyzed. And the influence of water-rock interaction on the deformation characteristics is discussed. The deformation and the curve of unloaded expansion ratio test are obtained. The experimental results show that sampling unloading has a great influence on the strength and compressibility, as well as the expansion deformation. Due to the unloading, the strength of mudstone decreases and the compression ratio of mudstone increases. The internal friction angle under unloading condition is smaller than that under the loading condition, while the value of cohesion increases. The unloading ratio and the loss strength rate are used to analyze the variation law of the strength of unloading mudstone. With the increase of the unloading ratio, the loss strength rate of unloading mudstone also increases. When the unloading ratio is between 0.7 and 0.8, the loss rate of mudstone strength is the largest. Compared with the unloading effect, the water-rock interaction has a greater influence on the deformation characteristics of unloading mudstone, and its structural damage to mudstone is up to  $30\% \sim 65\%$  during the sampling progress. So, the influence of sampling process on the strength and deformation characteristics of mudstone can't be ignored.

Key words: mudstone; sampling unloading; stress path; strength; deformation