

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.002

砂质泥岩三轴卸荷流变力学特性试验研究

邓华锋^{1,2,3}, 周美玲^{1,3}, 李建林^{1,3}, 胡亚运¹, 肖志勇¹, 王 宇¹

(1.三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100044;

3.三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 流变对工程岩体的长期变形稳定具有十分重要的影响,但目前关于卸荷流变的试验研究中通常只考虑恒轴压卸围压的应力路径,与隧洞开挖过程中围岩的应力调整过程存在一定的差距。以砂质泥岩为试验研究对象,设计进行了加轴压卸围压和恒轴压卸围压条件下的分级卸荷流变试验。试验结果表明:恒轴压卸围压和加轴压卸围压方案下岩样的流变变形趋势总体一致,但相同初始围压条件下,加轴压卸围压试样破坏的围压相对较高,偏应力相对较大,但长期强度与破坏应力的比值相对较小;在围压卸载至岩样临近破坏时,加轴压卸围压方案下岩样的流变应变增长速率明显较快,试样破坏的更加突然;恒轴压卸围压条件下岩样的破坏形态相对简单,一般只存在一条完整的剪切破坏面,而加轴压卸围压条件下岩样的破坏形态要复杂得多,除了控制性的剪切破坏面之外,还伴随有一定数量的次生剪裂和张拉裂纹,而且初始围压越大,试样的次生裂纹越多。因此,在隧洞围岩长期变形稳定分析过程中,单纯的恒轴压卸围压流变试验不能满足工程实际需求,应该尽量丰富岩石力学试验的应力路径,以便较好地模拟工程岩体应力的实际变化过程,研究成果为隧洞围岩的长期变形稳定性研究提供了较好的研究思路。

关 键 词: 砂质泥岩; 卸荷流变; 应力路径; 流变速率

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2016) 02—0315—08

Experimental research on unloading triaxial rheological mechanical properties of sandy mudstone

DENG Hua-feng^{1,2,3}, ZHOU Mei-ling^{1,3}, LI Jian-lin^{1,3}, HU Ya-yun¹, XIAO Zhi-yong¹, WANG Yu^{1,3}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education,

China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and

Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Rheology has extremely significant influence on the long-term deformation and stability of engineering rock mass. Current experimental research on unloading rheology only considers the stress path under unloading confining pressure with the constant axial stress, however it is different from the process of stress adjustment in surrounding rock during tunnel excavating. Stepwise unloading rheological tests are conducted on sandy mudstone samples which are under unloading confining pressure with the axial compression or with the constant axial stress. The results show that the rheological deformation trends of rock samples under both unloading confining pressure are generally consistent. At the same initial confining pressure, the failure confining pressure under axial compression and the deviatoric stress are relatively higher than that under constant axial stress, but the ratio of long-term strength to failure stress is opposite. When the confining pressure unloads reach up to the point where the rock sample approaches failure, the growth rate of rheological strain under axial compression obviously becomes faster than that under constant axial stress, and the failure occurs more suddenly. The failure modes of rock samples under constant axial stress usually appear as one complete shear failure plane. By contrast, the failure modes of rock samples under axial compression are more complicated with a certain

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 长江科学院开放研究基金资助项目 (No. CKWV2013208/KY); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金 (No. IWHR-SKL-201316); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51309141, 51309142); 水利部公益基金项目 (No. 201401029); 三峡大学土木与建筑学院硕士学位论文培优基金 (No. 2015PY11)。

This work was supported by CRSRI Open Research Program (CKWV2013208/KY), Open Research Foundation of Institute of Water Resources and Hydro-power Research and the State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin (IWHR-SKL-201316), the National Natural Science Foundation of China (51309141 and 51309142), Ministry of Water Resources Public Welfare Profession Special Scientific Research Foundation of China (201401029) and the Master Thesis Foundation of Civil and Architecture Institute of Three Gorges University (2015PY11).

第一作者简介: 邓华锋, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面研究。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

amount of secondary shear cracks and tension cracks, in addition to the controlled shear failure plane. Moreover, the secondary cracks increase with the increase of initial confining pressure. Therefore, the unloading confining pressure with the constant axial stress seems difficultly satisfy the requirement of engineering projects undergone a long-term deformation and stability of surrounding rock. The stress paths of tests should be conducted in more detail to simulate the actual stress change process of engineering rock mass. The results provide insights into the research on long-term deformation and stability of underground surrounding rock.

Keywords: sandy mudstone; unloading rheology; stress path; rheological rate

1 引言

工程实践表明, 岩体开挖卸荷后的失稳破坏具有明显的时间效应, 特别是地下洞室或巷道, 其在成洞之初是稳定的, 随着时间的推移, 其围岩变形不断发展, 最终可能导致洞体的失稳或坍塌, 此即为卸荷条件下的岩体流变现象^[1-6]。

近几十年来, 岩体流变问题越来越引起人们的重视, 各类岩石的流变试验得以大量开展。杨春和等^[7]详细研究了盐岩的流变特性; 赵延林等^[8]对金川有色金属公司 III 矿区二辉橄榄岩试样进行弹黏塑性流变试验分析; 熊良宵等^[9]对绿片岩进行了双轴压缩蠕变特性试验; 杨文东等^[10]对大岗山水电站坝基的辉绿岩进行了不同应力路径下的三轴流变试验; 朱定华^[11]对南京红层软岩进行了流变试验, 并根据试验数据得到了强风化泥岩、中风化泥岩、强风化泥质粉砂岩和微风化泥质粉砂岩的流变参数和长期强度; 徐卫亚等^[12]通过室内三轴流变试验研究了锦屏一级水电站坝基绿片岩的流变力学特性, 并建立了河海模型; 赵延林等^[13]根据对软弱节理矿岩蠕变试验数据的分析, 建立了一种适用于研究复杂条件下节理软岩黏弹塑性变形的新型复合元件流变模型。

近年来, 一些学者逐渐关注岩石的卸荷流变力学特性, 并逐步开展了一些试验研究。夏才初等^[14]对锦屏大理岩进行恒轴压分级卸围压应力路径下的三轴流变试验并进行了模型分析。朱杰兵等^[15]对乌江彭水水电站地下厂房泥质页岩进行了恒定轴压逐级卸载围压路径下的流变试验; 王宇等^[16-17]完成了节理岩体不同围压、不同轴向应力水平下的卸围压流变试验, 分析得到了不同倾角节理试样的流变速率及破坏机制, 建立了节理岩体卸荷的非线性损伤流变模型。

综合这些研究成果发现, 流变对工程岩体的长期变形稳定具有十分重要的影响, 以往在流变试验以及理论研究方面取得的研究成果为工程实践提供了重要的参考, 但在开挖卸荷岩体的流变研究中, 所考虑的试验方案通常是恒定轴压逐级卸除围压, 但这种应力路径与隧洞开挖时围岩的应力状态变化

存在一定的差距, 在隧洞开挖的过程中, 通常是径向卸载、切向加载。因此, 为了更好地掌握隧洞开挖后围岩的力学特性, 本文以新疆某水电站引水隧洞为研究背景, 选取洞线主要穿越的砂质泥岩为试验研究对象, 设计进行了卸围压加轴压三轴流变试验, 即在卸除围压的同时增大轴压, 这种应力路径比恒轴压卸围压方案更接近隧洞开挖过程中围岩应力调整的实际情况, 能更好地反映隧洞围岩的长期变形破坏特征。

2 试验方案

为了对比分析, 文中考虑了两种试验方案, 一种是常规的恒轴压卸围压试验方案; 另外一种是在加轴压卸围压试验方案, 具体的试验步骤如下:

方案 I: 恒轴压卸围压流变试验

(1) 按静水压力条件, 以 0.05 MPa/s 的速率逐步施加 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定值 (10、30 MPa)。

(2) 达到预定值且变形稳定后, 保持围压 σ_3 恒定, 施加轴向应力至设定的应力水平 (约为三轴压缩试验同围压下极限抗压强度的 60%)。

(3) 保持 σ_1 恒定, 以 0.05 MPa/s 的速率逐级卸围压, 记录岩样轴向应变及侧向应变与时间的关系, 直到岩样在该级应力水平下的流变变形趋于稳定再进行围压的下一级卸除, 如此逐级卸除围压直到岩样发生流变破坏。

方案 II: 加轴压卸围压流变试验

该方案的前两个步骤与方案 I 相同, 只是第 (3) 步不同, 该方案第 (3) 步的卸荷方式为: 在逐级卸除围压 σ_3 的同时以相同的速率逐级增大 σ_1 。

两种方案具体各级围压、轴压应力大小如表 1 所示。

本次卸荷流变试验在 RLW-2000 岩石三轴流变试验机上进行, 整个试验所处的环境温度保持在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。如图 1 所示, 该设备主要由机架、轴向稳压系统、侧向稳压系统、数字控制系统及微机系统等 5 部分组成, 采用先进的伺服控制、滚珠丝杠和液压等技术组合, 达到了良好的稳压效果, 可进行单轴压缩试验、三轴压缩试验、蠕变试验、松弛试验、渗流试验以及循环荷载试验等。设备最大轴

向荷载为 2 000 kN, 有效测力范围为 10~2 000 kN, 测力分辨率为 20 N, 测力误差 $\leq 0.5\%$; 最大围压为 60 MPa, 围压测量误差 $\leq 1\%$, 分辨率为 0.001 MPa。



Fig.1 RLW-2000 岩石三轴流变试验机
Fig.1 Rock rheological test machine RLW-2000

试验所需试样按照《水利水电工程岩石试验规程》^[18]和试验机要求制备, 岩样直径为 50 mm, 长度为 100 mm, 试样制备完成之后, 测试岩样质量、长度、直径、超声波纵波波速, 剔除离散性较大的岩样^[19]。

典型岩样照片如图 2 所示, 共选取 16 个试样进行三轴流变试验, 两种流变试验方案各有 8 个试样, 分别包括初始围压 10 MPa 和 30 MPa 两种情况。



图 2 典型岩样照片
Fig.2 Typical rock samples

3 试验结果分析

根据试验方案, 共完成了两种方案的三轴卸荷流变试验, 限于篇幅, 两种试验方案中分别以一个典型岩样的试验结果来进行深入的分析和探讨。

3.1 轴向及侧向流变变形规律分析

图 3 为岩样 R-3 (恒轴压卸围压方案) 在初始围压为 10 MPa, 轴向应力保持在 20 MPa 时分级卸除围压的流变试验曲线。图 4 为岩样 R-15 (加轴压卸围压方案) 在初始围压为 10 MPa, 初始轴向应力

为 20 MPa 时, 分级加轴压卸围压试验的流变曲线, 流变曲线上方数字表示各级围压值。

从图 3、4 可以看出, 两种试验方案中, 砂质泥岩试样在各级恒定围压下均包含明显的瞬时流变和稳态流变阶段, 在破坏围压水平下则从稳态流变阶段过渡到非线性加速流变阶段直至破裂, 这与常规的三轴流变的曲线特征总体是一致的。

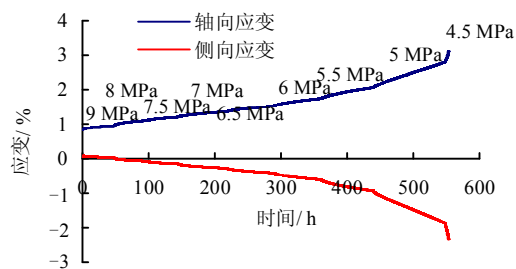


图 3 R-3 卸荷流变曲线
Fig.3 Unloading rheological curves of sample R-3

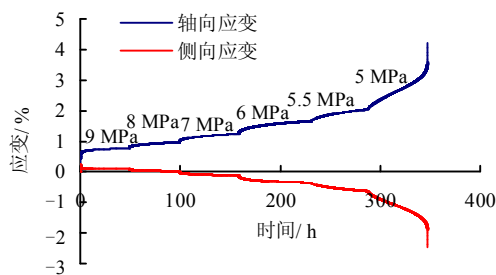


图 4 R-15 卸荷流变曲线
Fig.4 Unloading rheological curves of sample R-15

为了详细分析两种应力路径作用下砂质泥岩流变特性的差异, 特对试样在各级围压下的应变数据进行统计, 如表 1 所示。

综合图 3、4 和表 1 可以看出:

(1) 对于方案 I, 在围压逐级减小过程中, 试样侧向瞬时应变明显大于轴向的瞬时应变, 约为 2 倍左右; 试样的流变应变随着围压的卸除逐级增大, 在前几级卸围压时, 轴向流变应变略大于侧向的, 在临近破坏阶段, 侧向流变应变迅速增大并超过了轴向流变应变。说明在恒轴压卸围压过程中, 试样侧向变形特性较轴向更为显著, 侧向扩容效应明显。

(2) 对于方案 II, 在加轴压卸围压的过程中, 试样轴向瞬时应变明显大于侧向的瞬时应变, 约为 1.5 倍左右; 试样的流变应变随着围压的卸除逐级增大, 而且轴向流变应变的增长速率一直大于侧向流变。说明在加轴压卸围压试验中, 轴向应力的增加对岩样的轴向变形影响显著。

表1 典型岩样应变统计

Table 1 Statistics for strains of typical rock samples

试样 编号	应力 路径	轴压 σ_1 /MPa	围压 σ_3 /MPa	偏应力 /MPa	瞬时应变 / 10^{-6}		流变应变 / 10^{-6}	
					轴向	侧向	轴向	侧向
R-3	恒轴 压卸 围压	20.0	9.0	11.0	58	140	1 121	545
			8.0	12.0	94	183	1 354	838
			7.5	12.5	31	62	1 036	714
			7.0	13.0	27	73	1 506	1 149
			6.5	13.5	36	77	1 635	1 391
			6.0	14.0	9	18	2 144	1 940
			5.5	14.5	22	40	3 064	3 097
			5.0	15.0	45	92	7 425	9 404
			4.5	15.5	76	165	13 083	14 381
			21.0	9.0	171	55	1 820	122
R-15	加轴 压卸 围压	20.0	22.0	8.0	315	198	1 604	707
			23.0	7.0	342	209	1 468	1 147
			24.0	6.0	293	161	3 820	2 191
			24.5	5.5	203	164	3 729	2 616
			25.0	5.0	203	150	21 463	18 250
			25.0	5.0	203	150	21 463	18 250

(3) 对比方案 I 和方案 II 可以看出, 在逐级卸除围压过程中, 加轴压卸围压作用下岩样的流变应变总体大于恒轴压卸围压作用, 其中瞬时流变应变尤为明显。为了进一步分析应力路径对试样流变量随围压逐级降低过程中的变化趋势影响, 特统计两种试验方案下试样在各级围压下的轴向及侧向流变量, 如图 5 所示。

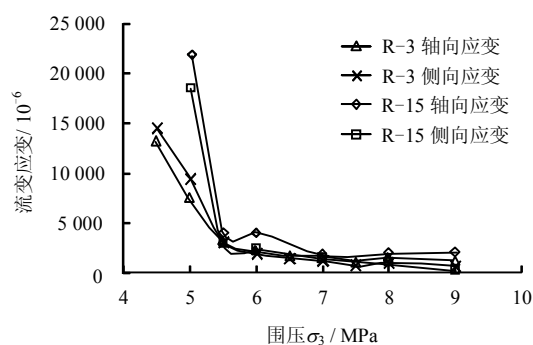


图5 试样流变量与围压的关系

Fig.5 Relationships between rheological deformation and confining pressure

综合表 1 和图 5 可以发现, 在围压逐级减小过程中, 两种试验方案下岩样的流变变化趋势基本一致, 但临近破坏时, 加轴压卸围压方案下, 岩样的流变应变增长速率明显增大, 与恒轴压卸围压方案差异明显, 说明轴压的增大, 导致岩样的流变变形破坏会更加突然。

(4) 方案 I 的岩样破坏围压为 4.5 MPa, 对应偏应力为 15.5 MPa; 方案 II 的岩样破坏围压为

5.0 MPa, 对应偏应力为 20 MPa。方案 II 的破坏围压略高, 但破坏时的偏应力差异明显。

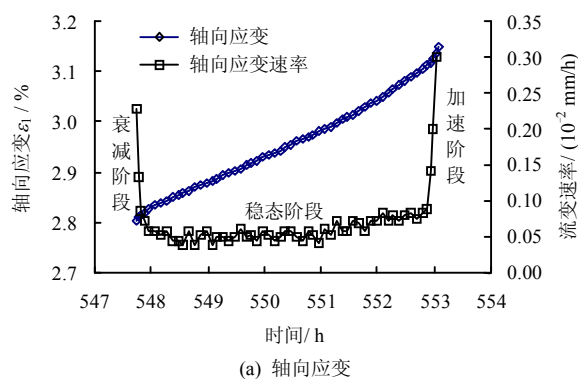
3.2 加速流变阶段规律分析

从砂质泥岩试样的卸荷流变曲线可以看出, 在较高的围压及较低的偏应力水平下, 试样变形逐渐趋于稳定, 主要表现出衰减流变和稳态流变阶段, 而在破坏围压水平下, 试样的流变变形表现出明显的非线性加速流变阶段, 这一阶段往往历时较短, 但却产生较大的流变变形, 试样也在该阶段迅速达到破坏。这是实际工程中研究的重点及热点问题, 对工程的长期稳定性具有深远影响, 因此, 对于该阶段试样变形特征的研究是极有必要的。

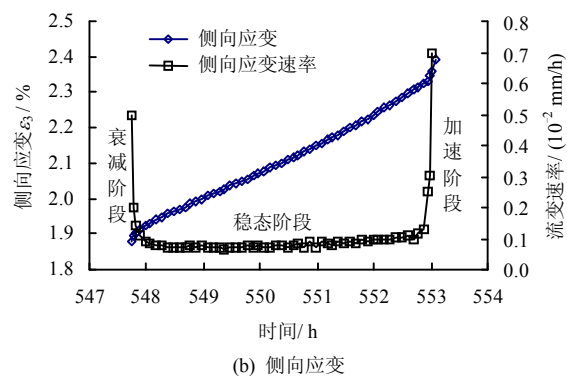
为了详细分析砂质泥岩试样在加速流变阶段的特点, 列出了两种试验方案下岩样在破坏围压水平的轴向及侧向流变速率变化曲线, 如图 6、7 所示。

从图 6、7 可以看出:

(1) 在破坏围压水平下, 两种试验方案下岩样的流变变化趋势基本一致, 均经历了岩石流变典型的 3 个阶段——衰减流变阶段、稳态流变阶段和非线性加速流变阶段, 且各阶段的规律较为明显, 总体而言, 试样的衰减流变阶段和加速流变阶段历时相对较短, 而稳态流变历时较长。



(a) 轴向应变



(b) 侧向应变

图6 破坏围压水平下应变及速率与时间的关系 (R-3)

Fig.6 Relationships between strain, strain rate and time under failure surrounding pressure (R-3)

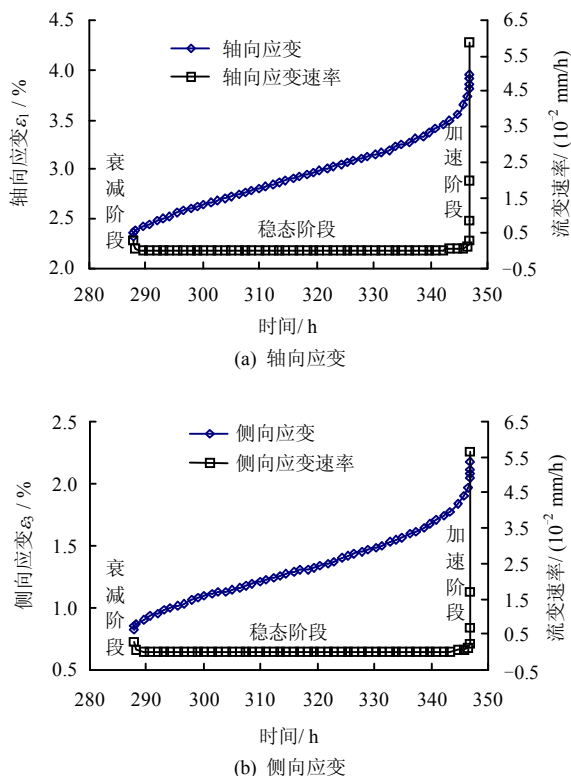


图7 破坏围压水平下应变及速率与时间的关系 (R-15)
Fig.7 Relationships between strain, strain rate and time under failure surrounding pressure (R-15)

(2) 对于方案 I, 在破坏围压水平下, 试样的侧向稳态流变平均速率约为轴向的 2 倍, 这表明在卸围压作用下侧向流变变形较轴向发展更为迅速, 呈现出显著的侧向扩容。

(3) 对于方案 II, 在破坏围压水平下, 试样的轴向稳态流变平均速率略大于侧向, 在进入加速流变阶段时, 试样的轴向及侧向流变速率均迅速非线性增大, 试样破裂历时很短。

(4) 对比方案 I、II 试验结果可以看出, 加轴压卸围压方案下, 岩样的稳态流变阶段的平均流变速率相对较小, 但非线性加速流变阶段的流变速率的增长速率明显快得多, 岩样破坏的更加突然。为了详细分析两种方案的差别, 特对破坏围压水平下各试样流变总历时及其稳态流变特性进行了统计分析, 结果如表 2 所示。

表2 破坏围压水平下试样流变历时统计
Table 2 Rheological diachronic statistics for samples under failure surrounding pressure

试样 编号	试验方案	非线性加速	稳态流变阶段		
		阶段占	占总历时	平均流变速率	
		总历时比例	比例	/(10 ⁻² mm/h)	
		/ %	/ %	轴向	侧向
R-3	恒轴压卸围压	9.34	86.29	0.049	0.076
R-15	加轴压卸围压	3.68	93.46	0.016	0.012

从表中可以看出, 在破坏围压水平下, 两种方案下岩样的流变特征差异明显。①恒轴压卸围压方案下, 试样的稳态流变阶段历时占总历时的比例相对较小, 具有相对较大的稳态流变速率, 而非线性加速阶段占总历时比例相对较大, 说明试样在该级应力水平施加后短时间内便表现出较为明显的破坏趋势, 而且最终破坏的速度相对较慢, 其流变破坏可预见性较高。②加轴压卸围压方案下, 试样的稳态流变阶段历时占总历时的比例相对较大, 稳态流变速率相对较小, 非线性加速阶段占总历时比例相对较小, 说明试样在经历较长时间的稳态流变后突然发生非线性加速流变破坏, 流变破坏可预见性较低。总体而言, 相较于恒轴压卸围压, 加轴压卸围压路径下岩石破坏更加突然, 这在工程中更应引起特别关注。

3.3 长期流变强度分析

岩体的长期强度是考虑时效特征条件下岩体的强度指标, 该值明显低于其常规瞬时强度。采用等时曲线法来确定砂质泥岩的长期强度如表 3 所示。

表3 试样的卸荷流变长期强度
Table 3 Long-term strength values of unloading rheology

试样 编号	试验 方案	初始 围压 /MPa	初始 轴压 /MPa	长期 强度 /MPa	破坏 应力 /MPa	长期强度 相应的围压 /MPa	强度比 /%
R-3	恒轴压	10	20	12.3	15.5	7.7	79.35
R-2	卸围压	30	40	16.8	22.5	23.2	74.67
R-15	加轴压	10	20	14.0	20.0	8.0	70.00
R-1	卸围压	30	40	21.2	30.0	24.4	70.67

从表中可以看出, 砂质泥岩长期强度约为其流变破坏强度的 70%~80%。取试样长期强度与破坏应力的比值为强度比, 通过对比可以看出, 加轴压卸围压条件下试样的强度比更小, 这说明相同卸围压速率下砂质泥岩更早进入屈服阶段。

4 应力路径对砂质泥岩流变特性差异分析

综合上述试验结果分析可以发现, 两种试验方案下, 砂质泥岩的卸荷流变特性总体相似, 但也存在明显差别, 分析其原因主要有以下几个方面:

(1) 如图 8 所示, 为典型岩样的强度包络线, 对于方案 I, 在 σ_3 减小的过程中, 摩尔圆圆心左移, 半径逐渐增大, 直至与强度包络线相切达到破坏状态; 对于方案 II, σ_3 减小的过程中, σ_1 同步增大, 摩尔圆圆心不动, 半径逐渐增大, 直至与强度包络线相切达到破坏状态。从图 8 中显示的结果来看,

试验得到的加轴压卸围压方案下岩样破坏时的偏应力相对较大,围压相对较高的结果是合理的。

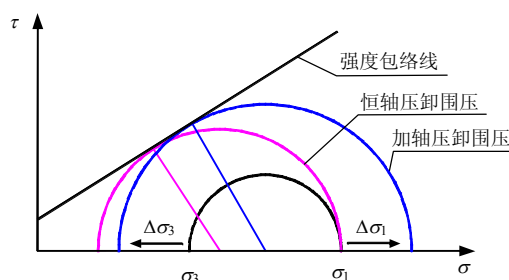


图8 摩尔强度包络线
Fig.8 Mohr strength envelopes

(2) 当岩石类材料进入塑性状态以后,岩石内部的微破裂形式以骨架和矿物颗粒的错动、滑移为主,而产生滑移就会有摩擦力的出现,此时摩擦力已经成为承载力的重要组成部分,摩擦力的大小主要受摩擦系数和正应力两个因素的影响,同种材料的摩擦系数不会变化^[20]。文献[20]分析也认为,岩样在塑性变形阶段的承载能力由围压确定,即通过摩擦来继续承载轴向应力。相比于恒轴压卸围压方案,加轴压卸围压条件下试样破坏时对应的围压要明显大一些,因此,可以承受更大的偏应力。

(3) 在恒轴压卸围压条件下,随着围压逐级卸除,偏应力逐渐增加,岩样内部逐渐形成剪切破坏面,在围压减小的过程中,剪切面上的正应力不断减小,使得摩擦力不断减小,同时,围压的减小对剪切面的扩展与形成具有明显的诱导作用,在这些因素的综合作用下,导致了该方案下试样的破坏以完整剪切破坏为主,而且这与前期研究中得到的常规三轴卸荷试验破坏特征是一致的^[21],典型岩样破坏照片如图9、10所示。

(4) 相对于恒轴压卸围压方案,轴压增加使得剪切面上的正应力增加,从而提高了摩擦力,而且相对较高的围压有效地限制了剪切面的开展,从而使得岩样可以承受更大的偏应力。但这个摩擦力不能无限制的提高,在剪切滑移过程中,由于砂质泥岩的抗拉强度较低,在较大的轴向压缩变形作用产生的横向拉应力超过其抗拉强度之后,就逐渐产生次生张拉裂纹,进而导致岩样破坏,这也能较好的解释加轴压卸围压方案下岩样的复杂破坏状态,典型岩样破坏照片如图11、12所示。同时,由于张拉破坏是一种速率较快的脆性破坏,这也导致了加轴压卸围压方案下岩样在非线性加速流变阶段的流变变形速率快速增长。



图9 R-3 破坏特征描图 (方案 I, $\sigma_3=10$ MPa)
Fig.9 Failure characteristics of sample R-3 (scheme I, $\sigma_3=10$ MPa)



图10 R-2 破坏特征图 (方案 I, $\sigma_3=30$ MPa)
Fig.10 Failure characteristics of sample R-2 (scheme I, $\sigma_3=30$ MPa)

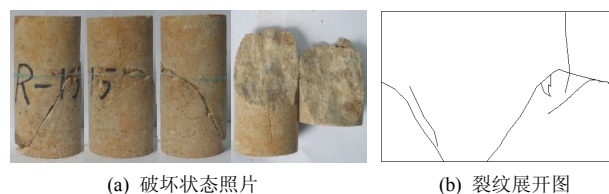


图11 R-15 破坏特征 (方案 II, $\sigma_3=10$ MPa)
Fig.11 Failure characteristics of sample R-15 (scheme II, $\sigma_3=10$ MPa)



图12 R-1 破坏形态 (方案 II, $\sigma_3=30$ MPa)
Fig.12 Failure characteristics of sample R-1 (scheme II, $\sigma_3=30$ MPa)

(5) 综合上述分析结果可以发现,不同的加卸载应力路径下,岩样的流变力学特性,特别是破坏阶段的变形特征、速率差异明显。因此,在隧洞围岩长期变形稳定分析过程中,单纯的恒轴压卸围压流变试验是不能满足工程实际需求,应该尽量丰富岩石力学试验的应力路径去较好地模拟工程岩体应力的实际变化过程,这样所得的试验结果才能更好的服务于工程。

5 结论

(1) 恒轴压卸围压和加轴压卸围压方案下泥质砂岩试样的流变变化趋势总体一致,在围压逐级卸除的过程中,两种试验方案下试样在各级稳定围压

下均表现出瞬时变形和流变变形, 在破坏围压水平均经历了衰减流变、稳态流变和非线性加速流变 3 个阶段, 其衰减流变阶段和非线性加速流变阶段历时较短, 稳态流变历时较长。

(2) 在围压卸载至岩样临近破坏时, 与恒轴压卸围压试验相比, 加轴压卸围压方案下岩样的流变应变增长速率明显较快, 试样破坏的更加突然, 脆性特征更加明显。

(3) 相同初始围压条件下, 与恒轴压卸围压试验相比, 加轴压卸围压试样破坏的围压相对较高, 偏应力相对较大, 长期强度与破坏应力的比值相对较小。

(4) 比较而言, 砂质泥岩在恒轴压卸围压条件下的破坏形态相对简单, 一般只存在一条完整的剪切破坏面; 而在加轴压卸围压条件下的破坏形态要复杂得多, 除了控制性的剪切破坏面之外, 伴随有一定数量的次生剪裂纹和张拉裂纹, 而且初始围压越大, 试样的次生裂纹越多, 破碎的越严重。这也说明了砂质泥岩在两种力学路径下的力学响应是存在明显差别的。

参考文献

- [1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081—1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081—1106.
- [2] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
LI Jian-lin. The theory and application of unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [3] BOUKHAROV G N, CHANDA M W, BOUKHAROV N G. The three processes of brittle crystalline rock creep[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(4): 325—335.
- [4] MARANINIE, BRIGNOLI M. Creep behavior of a weak rock: Experimental characterization[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(1): 127—138.
- [5] YANG Chun-he, DAEMEN J J K, YIN Jian-hua. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(3): 233—242.
- [6] 胡政, 刘佑荣, 武尚, 等. 高地应力区砂岩在卸荷条件下的变形参数劣化试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 78—84.
HU Zheng, LIU You-rong, WU Shang, et al. Experimental study of deformation parameters degradation of sandstone in high geostress regions under unloading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp. 1): 78—84.
- [7] 杨春和, 白世伟. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 270—275.
YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Stress level and loading path effect on time dependent properties of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 270—275.
- [8] 赵延林, 曹平, 陈沅江, 等. 分级加卸载下节理软岩流变试验及模型[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 748—753.
ZHAO Yan-lin, CAO Ping, CHEN Yuan-jiang, et al. Creep properties experiment and model of jointed soft rocks under step load and unload[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(7): 748—753.
- [9] 熊良宵, 杨林德, 张尧, 等. 锦屏二级水电站绿片岩双轴压缩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3928—3934.
XIONG Liang-xiao, YANG Lin-de, ZHANG Yao, et al. Experimental study on creep behaviors of greenschist specimen from Jinping II hydropower station under biaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp. 2): 3928—3934.
- [10] 杨文东, 张强勇, 陈芳, 等. 大岗山水电站坝区辉绿岩流变特性的三轴试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 64—70, 101.
YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, CHEN Fang, et al. Triaxial test research into rheological properties of diabase in Dagangshan Hydropower Station Dams site[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2011, 43(5): 64—70, 101.
- [11] 朱定华. 南京红层软岩流变特性试验研究[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(5): 77—79.
ZHU Ding-hua. Experimental study of Nangjing red-bed

- on rheology[J]. **Journal of Nanjing University of Technology**, 2002, 24(5): 77—79.
- [12] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433—447.
- XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, CHU Wei-jiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 433—447.
- [13] 赵延林, 曹平, 文有道, 等. 岩石弹黏塑性流变试验和非线性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 477—486.
- ZHAO Yan-lin, CAO Ping, WEN You-dao, et al. Elastovisco-plastic rheological experiment and nonlinear rheological model of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 477—486.
- [14] 夏才初, 闫子舰, 王晓东, 等. 大理岩卸荷条件下弹黏塑性本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 459—466.
- XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, WANG Xiao-dong, et al. Research on elasto-viscoplastic constitutive relation of marble under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 459—466.
- [15] 朱杰兵, 汪斌, 杨火平, 等. 页岩卸荷流变力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4552—4556.
- ZHU Jie-bing, WANG Bin, YANG Huo-ping, et al. Experimental study on rheological mechanical properties of shale under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp. 2): 4552—4556.
- [16] 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—3344.
- WANG Yu, LI Jian-lin, DENG Huan-feng, 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—3344.
- [17] 王宇, 李建林, 左亚, 等. 不同卸荷路径下贯通裂隙岩体流变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2900—2908.
- WANG Yu, LI Jian-lin, ZUO Ya, et al. Rheological experimental study of consecutive fractured rock mass under different unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34 (Supp. 1): 2900—2908.
- [18] 长江水利委员会长江科学院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission. SL264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.
- [19] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中岩样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399—3403.
- DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3399—3403.
- [20] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507—2513.
- JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. The effect of loading rate on the mechanical properties of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2507—2513.
- [21] 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—964.
- DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, 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—964.