

不同三轴应力途径下红砂岩力学特性试验研究

胡卸文^{1,2}, 伊小娟¹, 王帅雁¹, 黄润秋²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 针对大量地下工程(交通隧道、水电站地下厂房等)涉及的不同地应力环境对围岩稳定的控制作用,通过对四川盆地普遍分布的侏罗系红砂岩三轴试验研究,系统分析了红砂岩在三轴加载和卸载应力条件下的变形破坏特征以及强度特性,揭示了红砂岩在不同应力路径下所表现出来的破坏方式以及性质差异,表明加载应力环境下以剪切破坏为主,卸载应力环境下则以拉裂破坏为特点,且前者的破裂角要明显大于后者。同时还明显表现出相同岩石在加、卸载应力环境下强度参数的差异,从强度参数看,红砂岩内聚力 c 值表现为卸载比加载条件下小,而内摩擦角值则刚好相反,表现为卸载比加载条件下大。以高压(20MPa)卸载下所得强度参数为例,表明卸荷破坏下 c 值比加载条件下降低 22.8%,而 ϕ 值比加载条件下提高 57.2%,上述数据说明应力环境不同岩石强度参数差异明显,卸荷所导致的岩石强度参数弱化效应非常显著。

关键词: 红砂岩; 应力环境; 力学性质; 破坏方式

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0057-05

伴随国家经济建设战略重点向西部转移及西部大开发战略的实施,大量铁路、公路深埋特长隧道以及水电工程地下厂房在我国西部已经或正在修建,如位于既有铁路兰新线兰武段,已建目前中国最长的铁路隧道——“乌鞘岭隧道”全长 20.05km、洞身最大埋深 1100m 左右;而正在修建的国道 108 线四川雅(安)一西(昌)高速公路大相岭泥巴山隧道设计长为 10.1km、最大埋深约 2000m;另外正在修建的雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞设计长约 17.4km、洞身最大埋深为 2525m,上述隧道施工中可能遇见的不良地质主要有高地应力引起的坚硬岩岩爆与软岩大变形问题。

显然,由于深埋特长隧道普遍地处深山峡谷地区,地形地质条件复杂,其穿越的深部岩体所处的地质环境一般呈现“三高”特征,即高地应力、高地温和高渗透压力,并具有较强的时间效应,“三高”环境与时间效应使得深部岩体结构、基本行为特征和工程响应发生了

根本性变化^[1~5],这正是导致深部岩体工程中灾变事故多发和突发的根本原因。人们意识到岩石赋存环境对岩石的力学行为有着十分重要的影响,如深部岩体由于处在地应力条件下而与浅部岩体的力学行为有着显著差别,同时随着隧道工程施工,岩体将会由原受压(加载)而逐渐转为卸载的不同应力状态。因此,系统研究岩体(石)在加载和卸载两种应力状态下的力学行为^[6~7],为人类工程活动引起环境条件变化而导致深部岩体(石)力学性质的变化提供符合实际状况的岩体(石)力学性质参数,为围岩稳定性及其加固工程措施提供确切的地质参数是十分必要的。本文选择西南地区普遍分布的侏罗系红砂岩作为较软岩代表进行室内三轴试验,较系统地对比和分析了加载、卸载条件下的变形破坏方式及其力学参数变化特点。

1 试验概况

试验红砂岩饱和单轴抗压强度为 15~25MPa,属于较软岩,其胶结成分以铁质为主,天然密度 2.26g/m³。按高径比 2:1(直径 5cm、高度 10cm)进行制样,并在由长春市朝阳试验仪器有限公司生产的 TAWA—2000 微机控制三轴试验机上进行。

试验中对红砂岩进行了常规三轴加载及卸载试验(均为等围压状态),采用的是位移控制方法。加载试验首先将围压加到初始状态,再以 5mm/s 的速度施加轴向荷载,直至岩石发生破坏,试样以 rs 进行编号。

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2008-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772175, 40841025); 国家科技支撑计划课题(2008BAG07B01)资助; 地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室“科技减灾、重建家园”开放基金(DZKJ-08012); 西南交通大学科学研究基金(2008-A01)

作者简介: 胡卸文(1963-),男,博士,教授,博士生导师,从事工程地质、环境地质教学与研究工作。

E-mail: huxiewen@163.com

卸载试验则先将围压加到较高状态,然后施加轴向荷载至岩石破坏前的某一状态,保持轴向荷载不变,以0.5MPa/s的速度逐渐减小围压,直至试件破坏为止,试样以rs进行编号。

2 加载试验成果分析

2.1 变形破坏特征

以初始压力状态时的变形作为主应力方向应变轴的起点,得到5块岩样三轴加载下的应力-应变曲线(图1),从图中可见,红砂岩具有较为典型的弹塑性材料特性,即具明显的屈服特征,屈服前轴向应变约为 3×10^{-3} ,除2号试样外,其它试样屈服后很快进入软化并破坏阶段,均显示出脆性破坏特点。

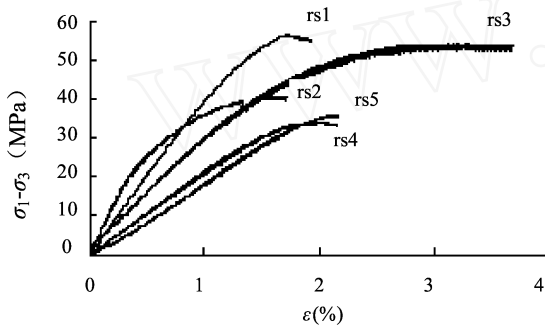


图1 红砂岩加载试验应力-应变曲线

Fig.1 Complete stress-strain curve of red sandstone in triaxial compression test

根据加载试验红砂岩破坏时的照片绘制的破坏特征素描见图2,不同荷载下的岩石破坏破裂角(破裂面与最大主应力方向的夹角)见表1,对比不同荷载下岩样变形破坏方式,各试样均以剪切破坏为主;而从不同围压下所得出的破裂角看,分别变化在22~40°之间,破裂角与围压大小关系变化不明显。

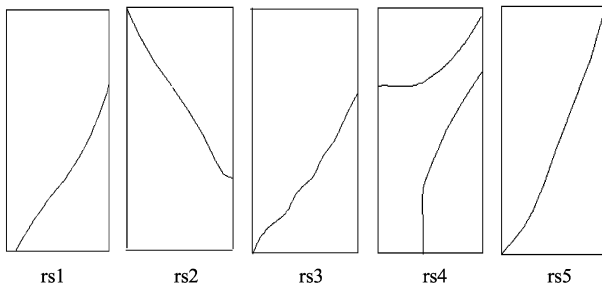


图2 红砂岩三轴加载试验破坏特征素描图

Fig.2 Failure characteristic of red sandstone in triaxial compression test

2.2 强度特性

2.2.1 峰值强度与围压的关系

表1 红砂岩加载试验破坏时的应力状态及破裂角

Table 1 Stress conditions and fracture angle of red sandstone specimens in triaxial compression test

岩石编号	破坏最大主应力 σ_1 (MPa)	围压 σ_3 (MPa)	破坏应力差 (MPa)	破裂角 ($^\circ$)
rs1	76.73	20	56.73	23
rs2	56.62	15	41.62	37
rs3	55.37	10	45.37	33
rs4	44.19	5	39.19	37~40
rs5	40.47	2.5	37.97	22

从图1中可看出,随着围压的增大,岩石的峰值强度(即破坏时的最大主应力)随之增大,由图3可见,围压与峰值强度基本为线性关系:

$$\sigma_1 = 1.901 \sigma_3 + 34.701, r = 0.9605$$

式中, σ_1 ——岩石峰值强度(破坏时的最大主应力)(MPa);

σ_3 ——岩石围压(MPa)。

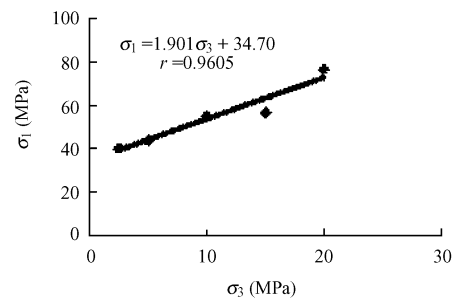


图3 红砂岩加载试验峰值强度与围压的关系

Fig.3 Relationship between peak strength and confining pressure of red sandstone in triaxial compression test

2.2.2 抗剪强度参数

通过上述5组试验成果,可得出红砂岩在加载过程达到破坏时的抗剪强度参数值,即内聚力C和内摩擦角 ϕ 。本研究通过以下两种方法获取,一是通过摩尔包络线法(图4),选取其中的3块试样,得出相应的抗剪强度表达式为:

$$\tau = 11.44 + 0.38 \sigma_n \quad (1)$$

除此以外,还可通过图3进行参数计算,即在 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 曲线上取一最佳直线段,求其斜率m和 σ_1 轴上的截距b,按式(2)求强度参数C、 ϕ 值。这种方法主要是为了减小人为因素的影响。

$$C = \sin^{-1} [(m - 1)/(m + 1)],$$

$$C = b(1 - \sin \phi)/2\cos \phi \quad (2)$$

两种方法得到红砂岩的C、 ϕ 值见表2。

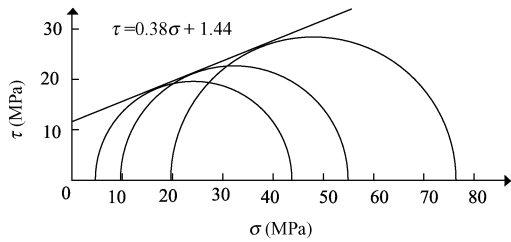


图4 红砂岩加载试验摩尔包络线

Fig. 4 Mohr's envelope of red sandstone in triaxial compression test

表2 红砂岩加载条件下 C、 ϕ 值

Table 2 Strength parameter C and ϕ of red sandstone in triaxial compression test

计算方法	C(MPa)	ϕ	平均值	
			C(MPa)	ϕ
摩尔包络线法	11.44	20.81	11.65	20.83
1~3 曲线法	11.86	20.85		

3 卸载试验结果分析

3.1 变形破坏特征

三轴围压卸荷条件下的应力 - 应变曲线见图 5。初始围压分别考虑了 5、8、10 和 20MPa,以初始围压 20MPa 为例,岩样达到屈服时的围压为 1.4 ~ 4.9MPa 不等,围压降低非常显著。同时与加载曲线相比,卸载条件下的变形曲线峰值明显降低,说明卸荷破坏时围压(σ_3)减小量比加载破坏时的轴压(σ_1)增加量要小得多,也说明卸荷更容易导致岩石破坏。另外从试样破坏后的变形曲线可见,曲线变化速率变缓,破坏方式由加载下的脆性过渡为“脆性 + 塑性”,也即塑性变形有所增加,这种破坏方式显然与其岩石软硬(属于较软岩)有关。

红砂岩在卸载条件下岩样破坏素描如图 6 所示,综合分析并比较加载过程破坏状况,具有如下特征:

(1) 卸荷条件下以张拉破坏为主,剪切破坏为辅;(2) 高

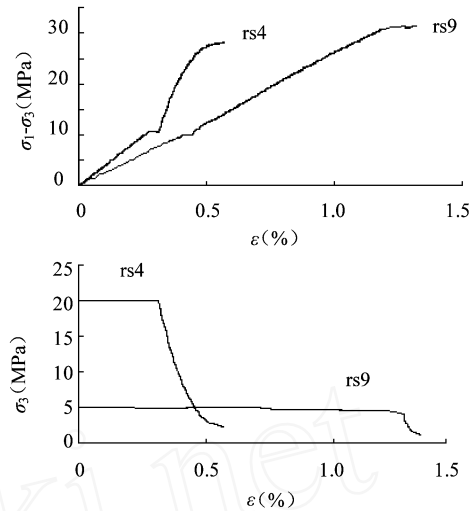


图5 rsf9 和 rsf4 岩样卸载应力 - 应变曲线

Fig. 5 Complete stress-strain curves of red sandstone specimen rsf9 and rsf4 in triaxial unloading test

围压卸载(初始围压为 20MPa,rsf1 ~ rsf5)与低围压卸载(初始围压小于 10MPa,rsf6 ~ rsf10)破坏特征进行对比发现,高围压比低围压破坏时的破裂面角度要小(一般破裂面与最大主应力方向夹角小于 15°),也就是说,初始围压越大,其破裂面角度越小(表 3)。

表3 红砂岩卸载试验岩样破裂角汇总表

Table 3 Summary of fracture angle of red sandstone in unloading test

岩石编号	最大主应力 (MPa)	破坏围压 (MPa)	破坏应力差 (MPa)	初始围压 (MPa)	破裂角 (°)
rsf1	49.9	4.8	45.1	20	0 ~ 13
rsf2	40.46	2.1	38.36	20	0
rsf3	30.15	1.36	28.79	20	14
rsf4	19.95	1.7	18.25	20	17
rsf5	50.46	5.32	45.14	10	12
rsf6	40.27	4.1	36.17	5	20
rsf7	40.53	5.93	34.6	8	22
rsf8	35.66	4.24	31.42	5	21
rsf9	30.32	2.54	27.78	5	21

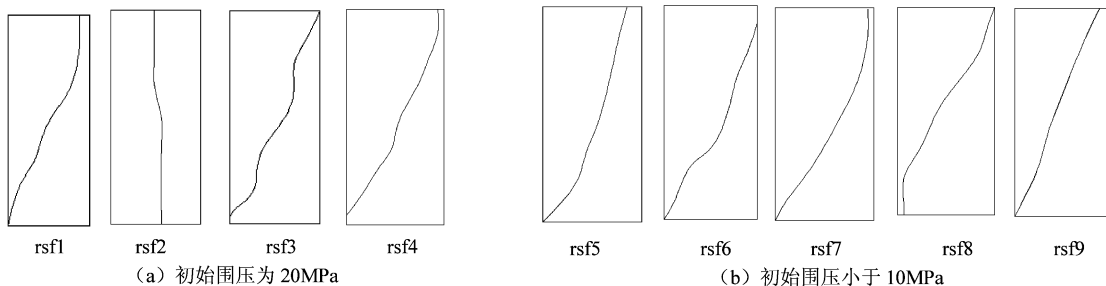


图6 不同初始围压条件下红砂岩卸载试验试样破坏特征图

Fig. 6 Failure characteristic of red sandstone in triaxial unloading test at different initial confining pressure

3.2 强度特性

3.2.1 破坏时轴向应力与围压的关系

根据不同围压条件,结合应力应变曲线(图5),分别按围压 20MPa 和 10MPa 破坏时轴向应力与相应破坏围压关系进行分析(图7,尽管样本数偏少,但仍反映出良好的变化规律)。总体上看,高、低围压卸载下破坏时的 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 曲线均基本呈近线性关系,但高围压的 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 曲线较缓,低围压卸载下 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 曲线则稍陡。如图可见,比较不同初始围压条件下的破坏时轴向应力与相应破坏围压,在同样轴向应力 σ_1 下,高初始围压下所需的破坏围压明显偏小,以 rsf2 和 rsf7 为例,前者(初始围压 20MPa)在轴向应力 σ_1 约 40.46MPa 下卸荷至破坏所需相应的围压为 2.1MPa,而后者(初始围压 5MPa)在轴向应力 σ_1 约 40.53MPa 下卸荷至破坏所需相应的围压为 5.9MPa。这说明初始围压越高,在尽量保持相同轴向应力 σ_1 下,卸荷破坏所需的围压 σ_3 可以更小,也即高围压卸荷条件下越易破坏,且以拉裂破坏为主。不同围压卸载下破坏时的 σ_1 与 σ_3 之间相关方程分别为:

初始围压 20MPa 下, $\sigma_1 = 4.95 \sigma_3 + 26.36$,
 $r = 0.9168$
 初始围压 10MPa 下, $\sigma_1 = 6.89 \sigma_3 + 11.27$,
 $r = 0.8511$

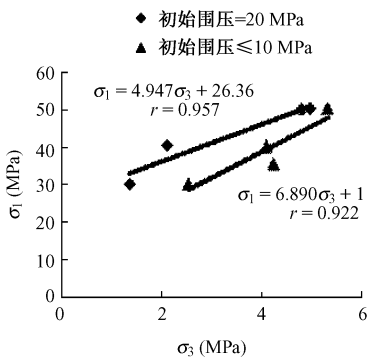


图7 卸载条件下红砂岩破坏时轴向应力与围压关系
 Fig.7 Relationship between peak strength and confining pressure of red sandstone in triaxial unloading test

3.2.2 抗剪强度参数

同样根据以上两种方法得到三轴卸载试验条件下的抗剪强度参数(图8和表4),与加载条件下的强度参数值作比较,可见红砂岩 C 值卸载比加载条件下要稍偏小,而 ϕ 值则刚好相反,表现为卸载比加载条件下要有所偏大。以高围压(20MPa)卸载下所得强度参

数为例,表明卸荷破坏下 C 值比加载条件下降低 22.8%,而 ϕ 值比加载条件下提高 57.2%。

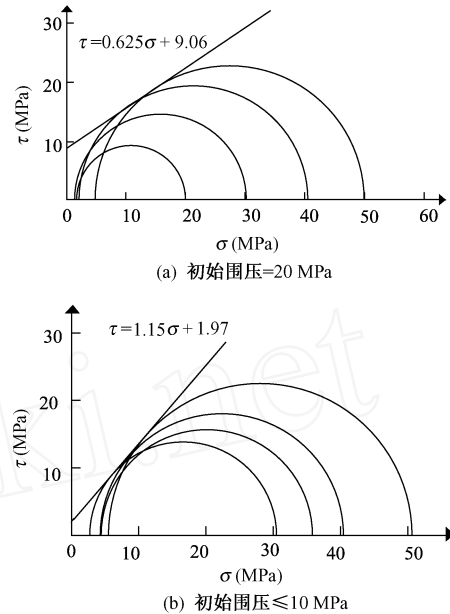


图8 红砂岩三轴卸载试验摩尔包络线
 Fig.8 Mohr's envelope of red sandstone in triaxial unloading test

表4 红砂岩卸载条件下三轴试验 C、 ϕ 值
 Table 4 Strength parameter C and ϕ of red sandstone in triaxial unloading test

试验方法	计算方法	C (MPa)	ϕ (°)	平均值	
				C (MPa)	ϕ (°)
加载	摩尔包络线	11.44	20.81	11.65	20.83
	$\sigma_1 \sim \sigma_3$ 曲线法	11.86	20.85		
卸载	初始围压为 20MPa	9.06	32	8.99	32.74
	摩尔包络线	8.92	33.47		
	初始围压小	1.97	49	2.07	49.11
	于 10MPa	2.17	49.23		

显然产生上述差异的主要原因是由于应力途径不同所致。在加载试验中,岩石三向均处于压缩状态,抗破坏时的强度宏观上内聚力更起到主导作用;而在卸载试验中,由于侧向应力逐渐减小,卸荷效应导致抗破坏时的岩石强度宏观上内聚力减小、同时更主要的由内摩擦角承担,而表现出 ϕ 值反而有所增大的现象。

理论上分析,高围压(20MPa)卸载下由于应力释放效应更突出,其强度参数应该小于较低围压(< 10MPa)下的相应值。不过从两种不同初始围压下得到的卸载条件下的强度参数看,高围压(20MPa)与较低围压(< 10MPa)卸载下相比,内聚力前者大于后者,而内摩擦角则前者小于后者,其规律性不明显,这可能与强度参数取值方法有关。

4 结论

(1) 相同或相近初始条件下,与加载曲线相比,卸载条件下的变形曲线峰值明显降低,表明卸荷破坏时围压(σ_3)减小量比加载破坏时的轴压(σ_1)增加量要小得多,也说明卸荷更容易导致岩石破坏。

(2) 应力环境不同,其破坏方式也各异。对以红砂岩这类较软岩而言,加载条件下岩石以剪切破坏为主,而卸载条件下因应力释放,则主要以拉裂破坏为特征。从卸载条件下试样破坏后的变形曲线可见,曲线变化速率变缓,破坏方式由加载下的脆性为主过渡为“脆性+一定量的塑性”,也即塑性变形有所增加。

(3) 由于加、卸荷应力环境下各自破坏方式的差异,红砂岩加载试验中试样破裂面的角度要比卸载试验中试样破裂面角度大。

(4) 从强度参数看,红砂岩内聚力 C 值表现为卸载比加载条件下要偏小,而内摩擦角 ϕ 值则刚好相反,表现为卸载比加载条件下要偏大。以高围压(20MPa)卸载下所得强度参数为例,表明卸荷破坏下 C 值比加载条件下降低 22.8%,而 ϕ 值比加载条件下提高 57.2%,说明应力环境不同岩石强度参数差异明

显,卸荷所导致的岩石强度参数弱化效应非常显著。

参考文献:

- [1] SHEN B, STEPHANSSON O. Cyclic loading characteristics of joints and rock bridges in a jointed rock specimen [C]//BARTON NR, STEPHANSSON O ed. Proc. Int. Symp. Rock Joints. [S. l.]: [s. n.], 1990: 725 - 729.
- [2] 李宏哲,夏才初,闫子舰,等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2104 - 2109.
- [3] 李天斌,王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321 - 327.
- [4] 高春玉,徐进,何鹏,等. 大理岩加卸荷力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456 - 460.
- [5] 陶履彬,夏才初,陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的实验研究[J]. 同济大学学报, 1985, 26(3): 330 - 334.
- [6] 孟召平,彭苏萍. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 15 - 18.
- [7] 姚孝新,耿乃光. 应力途径对岩石脆性-延性变化的影响[J]. 地球物理学报, 1980, 23(3): 312 - 319.

Study on red sandstone mechanical property under different stress path by triaxial test

HU Xie-wen^{1,2}, YI Xiao-juan¹, WANG Shuai-yan¹, HUANG Run-qiu²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: According to a large number of underground engineering (tunnels and underground power houses e. g.) involved in geo-stress level controlling the stability of surrounding rock, through triaxial test of red sandstone in Jurassic, the paper analyses on the deformation and failure characteristics of red sandstone under different conditions by triaxial loading and unloading, and reveals the damage modes and mechanical properties difference by different stress conditions. It is showed that shearing failure is primary under loading condition and tension failure is primary under unloading condition; the strength parameter difference is obvious under loading and unloading condition. The value of cohesion C under unloading condition is less than that under loading condition, and friction angle ϕ under unloading condition is bigger than that under loading condition. For instance, the strength parameters under unloaded high pressure (20MPa) show that the value of cohesion C by unloading decreases 22.8 percent than loading condition; ϕ increases 57.2 percent. The above results obviously show differences of strength parameters by different geo-stress environment, and the weakness of strength parameters caused by unloading is very significant.

Key words: red sandstone; geo-stress environment; mechanical property; damage mode

责任编辑:张明霞