

高围压高水压作用下脆性岩石强度变形特性试验研究

邢福东, 朱珍德, 刘汉龙, 阮怀宁, 王 军

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 对锦屏二级水电站引水隧洞大理岩、砂岩进行高围压高水压条件下全应力-应变过程三轴压缩试验,分析高围压高水压对脆性岩石变形、强度及脆-延转化特性的影响,探讨围压变化范围较大时岩石强度与围压及高孔隙水压之间的关系.结果表明:在较大围压范围内,有无施加水压力 2 种条件下, σ_1 与 σ_3 之间均呈非线性关系,高孔隙水压力加速了岩石的脆性破裂,降低了岩石的强度.

关键词 脆性岩石;高围压;高水压;全应力-应变过程;强度;变形

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2004)02-0184-04

岩石三轴压缩试验是测定岩石力学性质的基本试验方法,研究成果较多. von Karman 于 1911 年首次在普通试验机上得到了 Carrara 大理岩三轴压缩曲线,文 [1, 2] 在刚性试验机上分别得到了 Tenness 大理岩、多孔砂岩的三轴压缩应力-应变全程曲线.文 [3] 通过试验分析了大理岩三轴压缩及卸围压全过程力学特性.文 [4] 研究了复杂路径下粉砂岩试样的强度和变形特性.实际上,孔隙水压、渗透压等对岩石的力学性质影响也是相当显著的,而这方面的研究工作还比较少.文 [5] 采用花岗岩、砂岩研究了脆性岩石在不同围压及轴向渗流压作用下岩石的渗流与变形相关特性.实际工程中隧洞围岩往往处在高地应力、高水压力的复杂应力状态下,所表现出的力学性质与常规应力状态下围岩的力学状态不同.本文根据锦屏大理岩、砂岩不同围压及恒定孔隙水压下的三轴压缩试验结果,着重分析高围压高水压对脆性岩石强度及变形特性的影响.

1 高水压下的岩石三轴试验

1.1 试验原理及方法

高水压下全应力-应变过程三轴压缩试验是采用美国 MTS 公司生产的岩石力学电液伺服系统进行的.如图 1 所示,该试验系统配备轴压、围压和孔隙水压 3 套独立的闭环伺服控制系统.

试验时,先施加一定的围压 σ_3 ($\sigma_2 = \sigma_3$),同步施加均匀分布的孔隙水压 p_w 至预定值,然后保持围压和孔隙水压恒定不变,采用应变控制方式施加轴向压力,应变速率为 2.5 mm/300 s.

1.2 试样及试验条件

试样取自锦屏二级水电站地下引水隧洞围岩,为大理岩及砂岩,这 2 种岩石都属于脆性岩体.试验测得了其物理力学性质指标,见表 1.

为了尽量减小岩石离散性的影响,每类试样选用完整性很好的岩块.按照 SL264—2001《水利水电工程岩石试验规程》将其加工成直径 5 cm、高度约 10 cm 的圆柱体试件.每类岩石试样有 33 个,分为 2 组,一组为 18 个,另一组为 15 个.18 个试样的一组进行围压为 5 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa、45 MPa、60 MPa 下常规三轴压缩试验;15 个试样的一组分别在 11 MPa、20 MPa、30 MPa、45 MPa、60 MPa 围压,

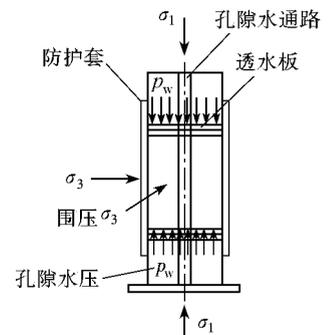


图 1 试验原理示意图

Fig. 1 Sketch of test principle

表 1 试验岩样物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical characteristic indexes of rock specimens

岩性	风干密度 ρ_d ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度 R_c /MPa	弹性模量 E_s /GPa	泊松比 ν
大理岩	2.797	114.51	34.280	0.181
中细砂岩	2.680	72.56	19.060	0.223

10 MPa 恒定孔隙水压下进行三轴压缩试验, 以便比较分析水压的影响。

2 高水压不同侧压三轴压缩全过程变形特性

岩石等围压三轴压缩曲线成果较多, 本文只给出试验获得的 10 MPa 孔隙水压力下大理岩及砂岩的典型三轴压缩全应力-应变曲线, 如图 2 所示。由图 2 可知: 当存在水压力时, 三轴压缩全过程曲线与常规三轴试验曲线基本相似, 随着围压的增加, 岩石的峰值强度和残余强度均有所增加, 峰后由脆性变形向延性变形逐渐转化, 大理岩的表现十分明显。此外, 2 种岩石的峰值前应力差-应变曲线斜率随围压的增加而有变陡趋势, 表明直线段平均弹性模量(杨氏模量)有所增加。

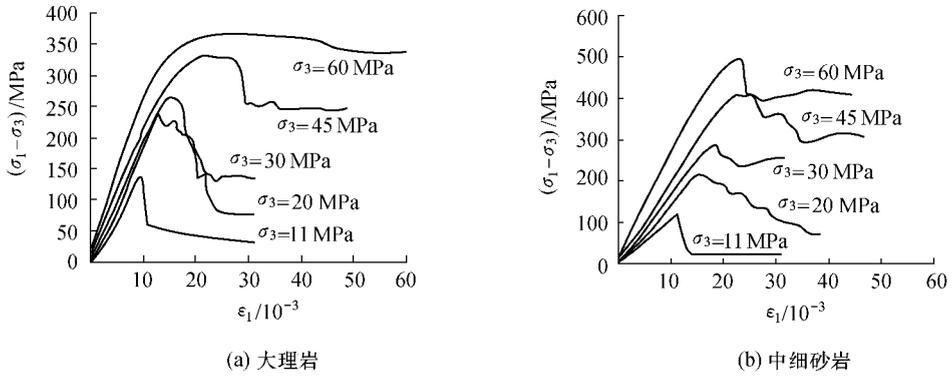


图 2 10 MPa 孔隙水压下岩石三轴压缩全应力-应变曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves of rock specimens under conventional triaxial compression with 10 MPa pore water pressure

为便于分析在高围压情况下孔隙水压的影响, 在图 3 中绘出了 2 种岩石在 60 MPa 围压下 2 种试验条件得出的典型应力-应变曲线。从图 3 可以看出, 砂岩在有无施加 10 MPa 水压时轴向应力-应变曲线形状差别不大, 而大理岩无水压时峰后塑性流动表现得要比有水压时更明显。此时, 无水压的大理岩峰后应力-应变曲线已基本不出现应力降, 表现为理想塑性, 60 MPa 围压可以作为该大理岩的脆-延性转化点。对于径向变形, 2 种条件下峰值前变形基本一致, 峰后砂岩有所差别, 这与试验试件破坏情况、破坏部位相对测量环向变形的环箍位置有关, 误差可能较大。

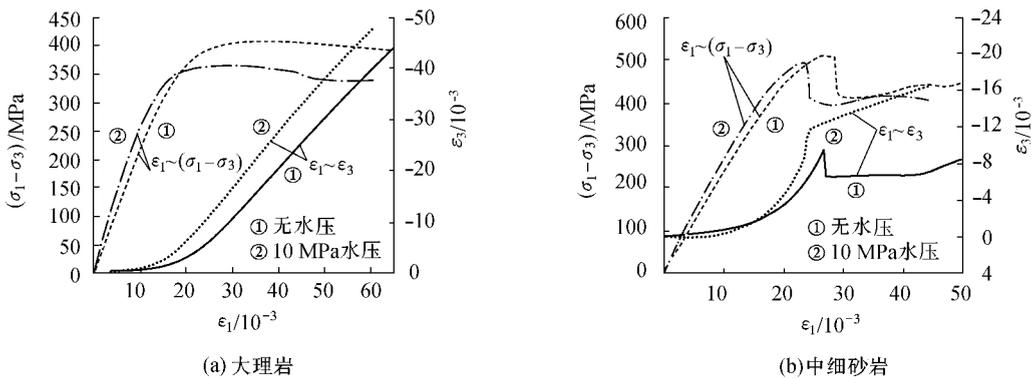


图 3 60 MPa 围压下岩石三轴压缩全应力-应变曲线

Fig.3 Complete stress-strain curves of rock specimens under triaxial compression with 60 MPa confining pressure

还有一点值得注意的是, 图 3 中施加 10 MPa 水压时的试样弹性模量要比无水压时略高。这可以解释为, 水压的存在增加了岩石的脆性, 试件受压达到峰值强度时所引起的轴向应变减小, 从而使得峰值前的平均弹性模量提高。

3 高水压不同侧压三轴压缩时的强度特性

试验结果表明, 围压、孔隙水压对岩石强度的影响显著。有无施加水压 2 种试验条件下, 随着 σ_3 的增大, 岩石的轴向破坏应力 σ_1 (峰值强度) 均会增大。由文 [6] 可知, σ_1 与 σ_3 符合线性关系, 关系式为

$$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3 \tag{1}$$

式中: σ_c ——岩石的单轴抗压强度; k ——岩性强度影响系数, 与岩性有关。

试验结果表明: 围压较低或围压范围较小时, σ_1 随 σ_3 的变化可用线性关系较好地表示; 围压范围较大时, 有无施加水压 2 种试验条件下, 二者关系均表现出明显的非线性, 可表示为

$$\sigma_1 = a\sigma_3^2 + b\sigma_3 + c \tag{2}$$

式中 a, b, c 为与岩性和试验条件有关的强度影响系数, 2 种岩石的拟合结果如图 4 所示, 拟合参数见表 2。

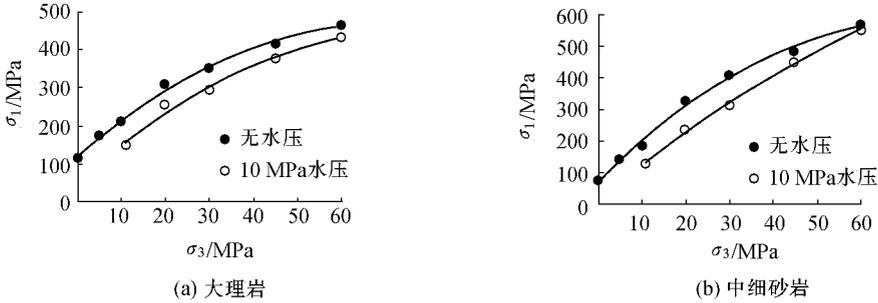


图 4 σ_1 与 σ_3 的关系

Fig. 4 Relationship between σ_1 and σ_3

由图 4 可知, 10 MPa 孔隙水压下的 σ_1 与 σ_3 关系线位于无水压的关系线下方. 这表明, 在相同侧向压力下, 存在孔隙水压力时的岩石峰值强度要低于无水压时的强度值. 如果定义 δ_{σ_1} 为孔隙水压引起的强度减小率, 即

$$\delta_{\sigma_1} = \frac{\sigma_1 - \sigma_{1w}}{\sigma_1} \times 100\% \tag{3}$$

式中 σ_1, σ_{1w} 分别为相同围压 σ_3 时的岩石三轴抗压强度及 10 MPa 水压力下的三轴抗压强度。

侧压为 20 MPa 时, 与无水压条件相比, 10 MPa 孔隙水压使得大理岩强度降低了 16.90%, 砂岩强度降低了 28.14%; 侧压为 60 MPa 时, 与无水压条件相比, 10 MPa 孔隙水压使得大理岩强度降低了 5.45%, 砂岩强度降低了 3.11%. 10 MPa 水压引起的强度降低程度随围压的变化关系可表示为

$$\delta_{\sigma_1} = Ae^{B\sigma_3} \tag{4}$$

式中: A, B 是与岩性、试验条件等有关的拟合参数。

式(4)图 5 表明, 随着围压的增大, 孔隙水压引起强度降低的程度有所减小. 在岩石所受水压小于或等于施加的围压条件下(水压大于围压可能会发生水力劈裂), 据式(4)可以推测: 当 $\sigma_3 = p_w$ 时, 水压对岩石强度的影响最大; 当 $\sigma_3 \gg p_w$ 时, 10 MPa 水压的影响将趋于 0。

施加水压降低强度的机理为, 在水压力作用下, 水渗入岩石的孔隙之中, 孔隙水压降低了固体颗粒间所承受的压力, 即有效应力, 从而降低了岩石的强度. 但孔隙水压的影响效果与岩石的孔隙比、胶结状况及围压大小有关^[7]. 孔隙比大的岩石透水性好, 岩石试件端面施加的水压力被传到所有孔隙, 此时孔隙水压的作用表现明显. 相反, 尤其在试件破坏之前, 孔隙比小、胶结程度很高的岩石试件内部孔隙不一定是连通的, 内部孔隙水压力并不等于端面施加的水压力, 而应为 βp_w . β 是与岩石孔隙率及孔隙连通情况有关的参数, 其值介于 0~1 之间. 即有效侧限应力要大于 $\sigma_3 - p_w$, 甚至接近于 σ_3 , 此时施加的水压对峰值强度影响要小得多. 随着围压的增大, 试件会压缩得更为紧密, 则孔隙透水性降低, 因此施加的水压对峰值强度的影响有所减弱. 这验证了图 5 中的试验结果.

表 2 岩石强度拟合系数

Table 2 Fitting coefficient of rock compression strength

岩性	水压 p_w /MPa	a	b	c	σ_3 /MPa	相关系数 R^2
大理岩	0	-0.072	9.989	120.940	0~60	0.98
	10	-0.071	10.537	51.041	11~60	0.98
中细砂岩	0	-0.093	13.760	72.081	0~60	0.99
	10	-0.051	12.211	2.924	11~60	0.99

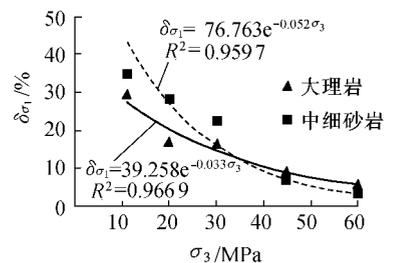


图 5 10 MPa 水压引起的强度减小程度
Fig. 5 Effect of 10 MPa pore water pressure on rock compression strength

4 结 论

a. 试验表明, 在较大围压范围内, 有无施加水压力 2 种条件下, σ_1 与 σ_3 之间并非线性关系, σ_1 随 σ_3 增大的变化过程可用二次抛物线拟合. 当围压较低或考虑的围压范围较小时, 为简便起见, 二者可用线性关系进行回归分析.

b. 在施加 10 MPa 水压的条件下, 岩石三轴压缩试验轴向应力与应变发展过程与常规条件下类似. 在 60 MPa 高围压下, 大理岩无水压时峰后塑性流动表现得要比有水压时更明显, 接近于脆-延性转化点, 砂岩差别不是很大.

c. 对岩石试验强度结果的定量分析直观地反映了水压力对脆性岩石强度的影响, 即水压力存在, 加速了岩石的破裂, 增加了材料的脆性, 从而降低了岩石的强度, 但水压力对强度的降低程度随围压的增大而有所减小.

参考文献:

- [1] WAWERSIK W R, FAIRHURST C. A study of brittle rock crack fracture in laboratory compression experiments[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1970, 7: 561—575.
- [2] GOWD T N, RUMMEL F. Effects of confining pressure on the fracture behavior of a porous rock[J]. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstra*, 1980, 17: 225—229.
- [3] 徐松林, 吴文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 763—767.
- [4] 尤明庆. 复杂路径下岩石的强度和变形特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 23—28.
- [5] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变渗流特性研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 555—558, 563.
- [6] 孟召平, 彭苏萍, 凌标灿. 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] 李先炜. 岩块力学性质[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983. 125—136.

Experimental study on strength and deformation characteristics of brittle rocks under high confining pressure and hydraulic pressure

XING Fu-dong, ZHU Zhen-de, LIU Han-long, RUAN Huai-ning, WANG Jun

(*Geo-technical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China*)

Abstract: By the complete stress-strain procedure triaxial compression tests of the marble and sandstone from the water diversion channel of the Jinping second-stage hydropower station under high confining pressure and hydraulic pressure, the effects of high confining pressure and hydraulic pressure on the strength, deformation and the characteristics of brittle-ductile transition of brittle rocks are analyzed, and the relationships between the strength, confining pressure, and high pore water pressure of rocks are also discussed for a wide range of confining pressure. The results show that the rock strength (σ_1) is of a nonlinear relationship with the confining pressure (σ_3) of rocks with or without the existence of hydraulic pressure, and that the high pore water pressure accelerates the brittle fracture of rocks and also reduces their strength.

Key words: brittle rock; high confining pressure; high water pressure; complete stress-strain procedure; strength; deformation